

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και
Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας σε σύμπραξη με το Τμήμα
Αυτοματισμού του Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας



ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΣΤΙΣ ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ, ΤΙΣ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ
ΕΚΜΗΧΑΝΙΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ

Αυτόματη ρύθμιση δικτύου ανοικτών καναλιών με τεχνικές
προσομοιωμένης ανόπτησης

Μεταπτυχιακή Εργασία

του

Ντελλής Αχιλλεύς





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7129/1
Ημερ. Εισ.: 05-05-2009
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
631.587
NTE

Αχιλλεύς Σ. Ντελλής

Αυτόματη ρύθμιση δικτύου ανοικτών καναλιών με τεχνικές προσομοιωμένης ανόπτησης

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Κουμπουλής Φώτιος
(Επιβλέπων) Καθηγητής Ρομποτικής και Βιομηχανικών Αυτοματισμών, Τμήμα Αυτοματισμού,
Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας.

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη Μαρία
(Επιβλέπων) Καθηγήτρια Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού
Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. .

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Καρράς Δημήτριος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ψηφιακών Συστημάτων, Τμήμα Αυτοματισμού, Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας.

*Αφιερώνεται σε ένα άνθρωπο, που μου άλλαξε την ζωή
(Ε.Μ.Β)*

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	5
Ευρετήριο Σχημάτων	8
Πρόλογος	11
1.0 Εισαγωγή.....	13
1.1 Ιστορική αναδρομή στους τρόπους άρδευσης	13
1.2 Μέθοδοι άρδευσης	14
1.3 Κριτήρια επιλογής του συστήματος άρδευσης	15
1.4 Περιγραφή μεθόδων άρδευσης	16
1.4.1 Επιφανειακή άρδευση	16
1.4.2 Υπόγεια άρδευση	17
1.4.2.1 Πλεονεκτήματα υπόγειας άρδευσης	18
1.4.2.2 Μειονεκτήματα υπόγειας άρδευσης.....	18
1.4.3 Άρδευση με καταιονισμό	18
1.4.3.1 Πλεονεκτήματα άρδευσης με καταιονισμό.....	19
1.4.3.2 Μειονεκτήματα άρδευσης με καταιονισμό	21
1.4.4 Στάγδην άρδευση	22
1.4.4.1 Πλεονεκτήματα στάγδην άρδευσης	23
1.4.4.2 Μειονεκτήματα στάγδην άρδευσης	26
1.5 Κανάλια άρδευσης	27
1.6 Τεχνικές ελέγχου για τα κανάλια άρδευσης.....	29
2.0 Εύρεση Μοντέλου Καναλιού Άρδευσης	32
2.1 MONTELO ΜΕΙΩΜΕΝΟΥ ΒΑΘΜΟΥ	33
2.2 Γραμμικοποίηση μη γραμμικού μοντέλου	33
2.2.1 Θεωρητική ανάλυση	33
2.2.1.1 Θεωρητική ανάλυση συστήματος χωρίς είσοδο	33
2.2.1.2 Θεωρητική ανάλυση συστήματος με είσοδο	34
2.2.2 Γραμμικοποίηση μη γραμμικού μοντέλου του καναλιού άρδευσης.....	36
2.3 Μοντέλο καναλιού Άρδευσης στο χώρο κατάστασης	38

2.4	Απόκριση του γραμμικού συστήματος ανοιχτού βρόχου για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων.....	40
2.5	Απόκριση του μη γραμμικού συστήματος ανοιχτού βρόχου για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων.....	43
2.6	Απόκριση γραμμικού και μη γραμμικού συστήματος ανοιχτού βρόχου για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων.....	46
2.6.1	Γραμμικό σύστημα ανοιχτού βρόχους.....	46
2.6.2	Μη γραμμικό σύστημα ανοιχτού βρόχους.....	47
3.0	Εύρωστη Ακολούθηση Βηματικής Εντολής και Εξασθένιση Διαταραχών.....	50
3.1	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	50
3.2	Πολυωνιμικό σήμα αναφοράς.....	50
3.3	Συνθήκες επίλυσης.....	52
3.4	Εφαρμογή εύρωστης προσεγγιστικής ακολούθησης βηματικής εντολής στο μοντέλου του αυλακιού άρδευσης	54
3.4.1	Δημιουργία διανύσματος κέρδους για το σύστημα του αυλακιού άρδευσης.	54
3.4.2	Υπολογισμός των παραμέτρων του ελεγκτή.....	60
3.4.2.1	Υπολογισμός της παραμέτρου $\underline{\varepsilon}_1$	60
3.4.2.2	Εύρεση ευστάθειας πολυωνύμου για τις διάφορες τιμές του $\underline{\varepsilon}_1$	61
3.4.2.3	Υπολογισμός της παραμέτρου $\underline{\varepsilon}_2$	62
3.4.2.4	Εύρεση ευστάθειας πολυωνύμου για τις διάφορες τιμές του $\underline{\varepsilon}_2$	63
3.4.2.5	Υπολογισμός ελεγκτή	64
3.5	Προσομοίωση Συστήματος Κλειστού Βρόχου	66
3.5.1	Προσομοίωση γραμμικού συστήματος.....	66
3.5.2	Προσομοίωση μη γραμμικού συστήματος.....	68
4.0	Εύρωστη Ακολούθηση Εντολής με Μηδενικό Σφάλμα Μόνιμης Κατάστασης και Εξασθένιση Διαταραχών.....	72
4.1	Σχεδίαση ελεγκτή για το μοντέλο του αυλακιού άρδευσης.....	72
4.2	Υπολογισμός των παραμέτρων του ελεγκτή.....	78
4.3	Προσομοίωση συστήματος	82
4.3.1	Προσομοίωση γραμμικού συστήματος.....	82
4.3.2	Προσομοίωση μη γραμμικού συστήματος.....	84
5.0	Διαγώνια αποσύζευξη εισόδων – εξόδων με ανατροφοδότηση κατάστασης.....	88

5.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	88
5.2	Διαγώνια αποσύζευξη για το μοντέλο του καναλιού άρδευσης	90
5.3	Γενική λύση των πινάκων ανατροφοδότησης και προενίσχυσης	90
5.4	Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	97
5.5	Ευστάθεια συστήματος κλειστού βρόχου	97
5.6	Προσομοίωση του αποσυζευγμένου συστήματος.....	98
5.7	Απόκριση του αποσυζευγμένου γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου	99
5.8	Απόκριση του αποσυζευγμένου μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου.....	100
6.0	Επιλογή των παραμέτρων των ελεγκτών προσεγγιστικής εντολής μέσω αλγορίθμου σύγκρισης των ριζών.....	103
6.1	Αλγόριθμος εύρεσης των τιμών του ελεγκτή	103
6.2	Εφαρμογή του αλγορίθμου για την επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή του Κεφαλαίου 3.0.....	104
6.2.1	Προσομοίωση γραμμικού συστήματος.....	104
6.2.2	Προσομοίωση μη γραμμικού συστήματος.....	105
6.3	Εφαρμογή του αλγορίθμου για την επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή του Κεφαλαίου 4.0.....	107
6.3.1	Προσομοίωση γραμμικού συστήματος.....	107
6.3.2	Προσομοίωση μη γραμμικού συστήματος.....	108
	Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα.....	111
	Βιβλιογραφία.....	114

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση καναλιού άρδευσης	28
Σχήμα 2: Παράθεση σημείων και οριακών συνθηκών	33
Σχήμα 3: Μεταβλητή ελέγχου 1	42
Σχήμα 4: Μεταβλητή ελέγχου 2	42
Σχήμα 5: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	42
Σχήμα 6: Στάθμη ύδατος στο μέσο του καναλιού	43
Σχήμα 7: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	43
Σχήμα 8: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού	43
Σχήμα 9: Μεταβλητή ελέγχου 1	44
Σχήμα 10: Μεταβλητή ελέγχου 2	44
Σχήμα 11: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	45
Σχήμα 12: Στάθμη ύδατος στο μέσο του καναλιού	45
Σχήμα 13: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	45
Σχήμα 14: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού	45
Σχήμα 15: Στάθμη στην είσοδο του καναλιού.....	46
Σχήμα 16: Στάθμη στην μέση του καναλιού	46
Σχήμα 17: Στάθμη στην έξοδο του καναλιού	47
Σχήμα 18:Ροή εξόδου	47
Σχήμα 19: Στάθμη στην είσοδο του καναλιού.....	47
Σχήμα 20: Στάθμη στην μέση του καναλιού	48
Σχήμα 21: Στάθμη στην έξοδο του καναλιού	48
Σχήμα 22: Ροή εξόδου	48
Σχήμα 23: Διάγραμμα συστήματος κλειστού βρόχου.	53
Σχήμα 24: Πρώτη ρίζα του συστήματος.....	65
Σχήμα 25: Δεύτερη ρίζα του συστήματος	65
Σχήμα 26: Τρίτη ρίζα του συστήματος.....	66
Σχήμα 27: Τέταρτη ρίζα του συστήματος	66
Σχήμα 28: Συνολικό διάγραμμα ριζών του συστήματος κλειστού βρόχου	66
Σχήμα 29: Εντολή Εισόδου u_1	67
Σχήμα 30: Εντολή Εισόδου u_2	67
Σχήμα 31: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	67
Σχήμα 32: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού	67
Σχήμα 33: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	68

Σχήμα 34: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού	68
Σχήμα 35: Εντολή Εισόδου w_1	68
Σχήμα 36: Εντολή Εισόδου u_2	68
Σχήμα 37: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	69
Σχήμα 38: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού	69
Σχήμα 39: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	69
Σχήμα 40: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού	69
Σχήμα 41: Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ελεγκτή.....	80
Σχήμα 42: Πρώτος πόλος του συστήματος.....	80
Σχήμα 43: Δεύτερος πόλος του συστήματος	80
Σχήμα 44: Τρίτος πόλος του συστήματος.....	81
Σχήμα 45: Τέταρτος πόλος του συστήματος	81
Σχήμα 46: Πέμπτος πόλος του συστήματος	81
Σχήμα 47: Συνολικό διάγραμμα ριζών του συστήματος κλειστού βρόχου	81
Σχήμα 48: Εντολή Εισόδου w_1	82
Σχήμα 49: Συνάρτηση διαταραχών u_2	82
Σχήμα 50: Σήμα διαταραχών	83
Σχήμα 51: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	83
Σχήμα 52: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού	83
Σχήμα 53: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	83
Σχήμα 54: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού	84
Σχήμα 55: Εντολή Εισόδου w_1	84
Σχήμα 56: Σήμα διαταραχών	84
Σχήμα 57: Σήμα διαταραχών	84
Σχήμα 58: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	85
Σχήμα 59: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού	85
Σχήμα 60: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	85
Σχήμα 61: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού	85
Σχήμα 62: Σύστημα κλειστού βρόχου	98
Σχήμα 63: Μεταβλητή ελέγχου 1	98
Σχήμα 64: Μεταβλητή ελέγχου 2	99
Σχήμα 65: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	99
Σχήμα 66: Στάθμη ύδατος στο μέσο του καναλιού	99
Σχήμα 67: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	100
Σχήμα 68: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού.....	100
Σχήμα 69: Μεταβλητή ελέγχου 1	100
Σχήμα 70: Μεταβλητή ελέγχου 2	101

Σχήμα 71: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	101
Σχήμα 72: Στάθμη ύδατος στο μέσο του καναλιού	101
Σχήμα 73: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	101
Σχήμα 74: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού.....	102
Σχήμα 75: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	105
Σχήμα 76: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού	105
Σχήμα 77: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	105
Σχήμα 78: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού.....	105
Σχήμα 79: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	106
Σχήμα 80: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού	106
Σχήμα 81: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	106
Σχήμα 82: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού.....	106
Σχήμα 83: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	107
Σχήμα 84: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού	108
Σχήμα 85: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	108
Σχήμα 86: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού.....	108
Σχήμα 87: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού.....	109
Σχήμα 88: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού	109
Σχήμα 89: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού	109
Σχήμα 90: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού.....	109

Πρόλογος

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τεχνικές ελέγχου για τα κανάλια άρδευσης. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτή μπορούν να βρουν πολλές εφαρμογές στα κανάλια άρδευσης, στον έλεγχο της ροής σε ποταμούς και στον έλεγχο δεξαμενών άρδευσης. Πιο συγκεκριμένα:

Στο κεφάλαιο ένα παρουσιάζεται μία γενική αναφορά στην ιστορία των αρδεύσεων. Στην συνέχεια γίνεται ένας διαχωρισμός στις μεθόδους άρδευσης και δίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα για κάθε μία από τις μεθόδους αυτές. Τέλος παρατίθενται οι τεχνικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των καναλιών άρδευσης.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το μοντέλο του καναλιού άρδευσης όπως προκύπτει από τις εξισώσεις Saint-Venant. Στην συνέχεια γίνεται γραμμικοποίηση του μοντέλου και προσομοίωση του συστήματος ανοικτού βρόχου με χρήση του μαθηματικού πακέτου mathematica και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του γραμμικού και μη γραμμικού μοντέλου ανοικτού βρόχου.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού ενός ελεγκτή για εύρωστη προσεγγιστική ακολούθησης εντολής. Παρουσιάζονται οι συνθήκες επίλυσης του προβλήματος και γίνεται εφαρμογή του νόμου ελέγχου που προκύπτει στο γραμμικό και μη γραμμικό μοντέλο του οχήματος. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του γραμμικού και μη γραμμικού μοντέλου κλειστού βρόχου για σταθερές τιμές των διαταραχών και για τρεις διαφορετικές τιμές των αβεβαιοτήτων τιμές.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού ενός ελεγκτή για εύρωστη ακολούθηση εντολής και εξασθένιση διαταραχών. Παρουσιάζονται οι συνθήκες επίλυσης του προβλήματος και γίνεται εφαρμογή του νόμου ελέγχου που προκύπτει στο γραμμικό και μη γραμμικό μοντέλο του οχήματος. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του γραμμικού και μη γραμμικού μοντέλου κλειστού βρόχου για τρεις διαφορετικές τιμές των αβεβαιοτήτων τιμές.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης ελεγκτή για την διαγώνια αποσύζευξη εισόδων - εξόδων για το μοντέλο του καναλιού άρδευσης. Αρχικά παρουσιάζεται η θεωρητική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος. Με υπολογισμό του ελεγκτή και εφαρμογή του στο σύστημα του καναλιού, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος κλειστού βρόχου.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η διαδικασία επιλογής των παραμέτρων των ελεγκτών που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3 και 4 μέσω ενός αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης (metaheuristic). Η επιλογή των παραμέτρων γίνεται με τρόπο έτσι ώστε το σύστημα κλειστού βρόχου να έχει τους πόλους του όσο πιο αριστερά γίνεται στο μιγαδικό ημιεπίπεδο. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του γραμμικού και μη γραμμικού μοντέλου κλειστού βρόχου για τρεις διαφορετικές τιμές των αβεβαιοτήτων τιμές.

Στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται συμπεράσματα και γίνεται συνολική αξιολόγηση των ελεγκτών που εφαρμόζονται στο όχημα.

Στο σημείο αυτό, θεωρώ χρέος μου, να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου Δρ. Μ. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη, Δρ. Μ. Τζαμτζή, Δρ. Α. Καρράς για τις γνώσεις που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ιδιαίτέρως ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Φ. Ν. Κουμπουλή για την αμέριστη συμπαράσταση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας για την εκπόνηση της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας. Θερμά ευχαριστώ στον Μιχαήλ Γ. Σκαρπέτη για την αμέριστη βοήθεια του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

1.0 Εισαγωγή

1.1 *Ιστορική αναδρομή στους τρόπους άρδευσης*

Οι πρώτες κοινωνίες βασίστηκαν στην άρδευση των τεσσάρων μεγάλων ποτάμιων κοιλάδων: του Νείλου στην Αίγυπτο (6000 π.Χ.), τον Τίγρη και του Ευφράτη στη Μεσοποταμία (4000 π.Χ.), του Κίτρινου Ποταμού στην Κίνα (3000 π.Χ.) και του Ινδού στην Ινδία (2500 π.Χ.). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η άρδευση γινόταν πλημμυρίζοντας με νερό περιοχές, οι οποίες περιβάλλονταν με χωμάτινα φράγματα. Στην Αίγυπτο κατασκευάστηκε το αρχαιότερο φράγμα του κόσμου, μήκους 107 m και ύψους 12m, το οποίο αποθήκευε νερό για άρδευση και ύδρευση. Στην Κίνα, ο επιτυχημένος βασιλέας κρινόταν από τη σοφία με την οποία διαχειριζόταν τα νερά, ενώ στην Ινδία, η ιστορία των αρδεύσεων είναι τόσο αρχαία, όσο και η ιστορία της χώρας. Μάλιστα, υπάρχουν στοιχεία ότι κατά το έτος 300 π.Χ. ολόκληρη η χώρα αρδευόταν πραγματοποιώντας δύο σοδειές κάθε έτος.

Στο Μεξικό και στη Νότια Αμερική η άρδευση αναπτύχθηκε από τους πολιτισμούς των Μάγια και των Ίνκας, πριν από 2000 χρόνια, και σε πολλές περιοχές συνεχίζεται η εφαρμογή της άρδευσης, με τον ίδιο τρόπο, μέχρι σήμερα. Στην Αμερική οι Ινδιάνοι των νοτιοδυτικών περιοχών εφάρμοσαν την άρδευση γύρω στο 100 π.Χ. Οι Ισπανοί κατακτητές έμαθαν στους Ινδιάνους νέους τρόπους άρδευσης, επιτρέποντας τους έτσι να δημιουργήσουν οικισμούς και να εξασφαλίσουν μια σίγουρη πηγή τροφής. Μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο η διάδοση της καλλιέργειας των φυτών με εφαρμογή αρδευτικών μεθόδων υπήρξε ταχύτατη, με αποτέλεσμα μια πολύ μεγάλη ανάπτυξη των συστημάτων άρδευσης καθώς και επέκταση του εύρους εφαρμογών τους. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας ήταν αποφασιστικής σημασίας στην εξέλιξη αυτή.

Έξι χιλιάδες χρόνια πριν, γεωργοί της Μεσοποταμίας, στο σημερινό Ιράκ δηλαδή, δημιούργησαν ένα αυλάκι για να πάρουν νερό από τον Ευφράτη και να ποτίσουν τα διψασμένα χωράφια τους. Αυτό θεωρείται το πρώτο αρδευτικό έργο στην ιστορία της ανθρωπότητας. Από τότε οι άνθρωποι βρήκαν πολλές λύσεις για να παίρνουν καρπούς από τη γη και σε μέρη όχι και τόσο γενναιοδωρα. Πριν από 2.000 χρόνια, για πρώτη φορά, Κινέζοι χρησιμοποίησαν τη μέθοδο με τις στάμνες για να ποτίζουν με τη μεγαλύτερη δυνατή οικονομία διάφορα χρήσιμα φυτά. Είτε οι στάμνες γέμιζαν από τη βροχή είτε από τους ίδιους τους αγρότες, όχι μόνο γινόταν μεγάλη οικονομία στο νερό αλλά και η παραγωγή ήταν μεγαλύτερη. Τα κλασικά αυλάκια που τρέχουν μέσα στους αγρούς σήμερα δεν θεωρούνται ο ιδεώδης τρόπος ποτίσματος. Και τα φυτά πιέζονται (ναι, ακόμη και αυτά στρεσάρονται) και πολύ νερό περνάει και φεύγει χωρίς να δίνει αυτό που θα θέλαμε. Αντίθετα, το υγρό στοιχείο που σιγά - σιγά διαχέεται μέσα από τους πόρους του κεραμικού υλικού της στάμνας και φθάνει υπόγεια και ήρεμα ως τις ρίζες αξιοποιείται πολύ καλύτερα από το φυτό στην ώρα του, και μάλιστα χωρίς απώλειες, ενώ η εξάτμιση - χάρη στον στενό λαιμό της στάμνας - έχει περιοριστεί αποτελεσματικά. Αυτή την παμπάλαια και σοφή τεχνική δοκίμασε στις ημέρες μας ένας Γερμανός υδρογεωλόγος, ο Michael Klingler, με αρκετά μεγάλη επιτυχία: η παραγωγή των ταπεινών αλλά

πολύτιμων στη μαγειρική του τόπου κρεμμυδιών αυξήθηκε, ενώ στη Χαμπάμπα εμφανίστηκαν στα δέντρα πολύ περισσότερα λεμόνια από πριν, πράγματα όχι συνηθισμένα για αυτή την άνυδρη περιοχή του κόσμου.

Η άρδευση σήμερα αποτελεί τη βάση της γεωργίας στην πιο εξελιγμένη της μορφή. Ενώ όμως τα αποτελέσματα πάνω στη γεωργία από τη σωστή εφαρμογή των αρδεύσεων είναι εντυπωσιακά, η μη σωστή χρήση του αρδευτικού νερού μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά, με μακροχρόνιες επιπτώσεις, προβλήματα υποβάθμισης της γονιμότητας των εδαφών. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της Μεσοποταμίας στην οποία, ενώ η άρδευση κατά τους αρχαίους χρόνους είχε σαν αποτέλεσμα μεγάλη ανάπτυξη και ευημερία, στη συνέχεια συντέλεσε στην προοδευτική υποβάθμιση της γης με συνέπεια οι εκτάσεις αυτές σήμερα να είναι ημιάγονες.

Βασική επιδίωξη όλων των γεωργικά προηγμένων κρατών, στον αγροτικό τομέα, αποτελεί σήμερα η επίτευξη υψηλών αποδόσεων με το μικρότερο δυνατό κόστος

Στην πραγμάτωση του στόχου αυτού, η άρδευση φαίνεται να διαδραματίζει ρόλο αποφασιστικής σημασίας. Αυτό εξηγεί το τεράστιο ενδιαφέρον που εκδηλώνεται διεθνώς κατά τα τελευταία χρόνια για την όσο το δυνατόν πληρέστερη αξιοποίηση των υδάτινων πόρων.

Οι τάσεις που κυριαρχούν σήμερα στον τομέα των αρδεύσεων είναι, από τη μια πλευρά η αύξηση των αρδευόμενων εκτάσεων με κατασκευή νέων αρδευτικών έργων και από την άλλη πλευρά η ανάπτυξη συστημάτων άρδευσης με ελάχιστες απαιτήσεις σε εργατικά χέρια, με υψηλή αποτελεσματικότητα και με μεγάλες δυνατότητες για μείωση των απωλειών κατά την εφαρμογή του νερού.

Συνέπεια των τάσεων αυτών αποτελεί το τεράστιο ενδιαφέρον που εκδηλώνεται τελευταία διεθνώς για ανάπτυξη και εφαρμογή συστημάτων άρδευσης μερικώς έως πλήρως αυτοματοποιημένων, τα οποία ελαχιστοποιούν σε μεγάλο βαθμό το κόστος εφαρμογής του νερού, επιτυγχάνουν υψηλότερες αποδόσεις των καλλιεργειών και μηδενίζουν σχεδόν τις απώλειες κατά τη διανομή και χορήγηση του νερού στα φυτά. Σ' αυτό, φυσικά, βοήθησε σοβαρά η ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα της κατασκευής πλαστικών σωλήνων και κάθε είδους πλαστικών εξαρτημάτων συνδεσμολογίας, αλλά και η πρόοδος στην κατασκευή ποικίλων ηλεκτροδραυλικών αυτοματισμών.

Τελικά, ίσως να είναι πολλοί αυτοί που θα ισχυριστούν ότι το νερό δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε δραστηριότητες "δευτερεύουσας σημασίας" για τον άνθρωπο, προκειμένου να διαφυλαχτούν κάποιες ποσότητες από αυτό, αναφερόμενοι, για παράδειγμα, στην άρδευση των κήπων, των πάρκων και των χώρων πρασίνου. Όμως, ο χώρος που μας περιβάλλει αφενός, και η κατάσταση στην οποία βρίσκεται αφετέρου, αντικατοπτρίζουν την ποιότητα της ζωής μας και τον πολιτισμό μας και η λύση δε θα δοθεί με τον εξοβελισμό των παραπάνω δραστηριοτήτων, αλλά με τη σωστή διαχείριση του πολύτιμου φυσικού πόρου, που καλείται νερό ().

1.2 Μέθοδοι άρδευσης

Συστήματα άρδευσης ονομάζονται οι διάφοροι τρόποι εφαρμογής του αρδευτικού νερού στα κτήματα . Ονομάζονται ακόμη και μέθοδοι άρδευσης.

Οι διάφοροι αυτοί τρόποι εφαρμογής του αρδευτικού νερού στα κτήματα , είναι αποτέλεσμα της μακροχρόνιας εμπειρίας και εξαρτώνται από τις εδαφικές συνθήκες, την τοπογραφική διαμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους , το είδος των καλλιεργειών και τη γεωργοτεχνική παράδοση των γεωργών. Με την ανάπτυξη της επιστήμης των αρδεύσεων οι διάφοροι αυτοί εμπειρικοί τρόποι μελετήθηκαν, βελτιώθηκαν και προσαρμόστηκαν στις συνθήκες του εδάφους, των καλλιεργειών και του ανθρώπινου παράγοντα.

Αναπτύχθηκαν συγχρόνως μαθηματικοί τρόποι ελέγχου της εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού και της ομοιόμορφης άρδευσης. Η ομοιόμορφη εφαρμογή του αρδευτικού νερού είναι πάντοτε ο πρωταρχικός παράγοντας της αρδεύμενης γεωργίας για την αποδοτική χρησιμοποίηση του νερού άρδευσης. Ο έλεγχος του αρδευτικού νερού για την επίτευξη ομοιόμορφης διανομής πάνω στην έκταση που πρόκειται να αρδευτεί είναι ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα του καλού χειρισμού του νερού και εξακολουθεί να υπάρχει ως πρόβλημα στις περισσότερες αρδεύμενες εκτάσεις.

Ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του νερού στο χωράφι, διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες συστημάτων ή μεθόδων άρδευσης:

1. Επιφανειακή άρδευση
2. Υπόγεια άρδευση
3. Άρδευση με καταιονισμό
4. Άρδευση με σταγόνες (στάγδην άρδευση)

Από τις κατηγορίες αυτές η πρώτη , η άρδευση με κατάκλυση, φαίνεται ότι είναι η αρχαιότερη και πιο διαδεδομένη μέθοδος εφαρμογής του αρδευτικού νερού. Η δεύτερη τείνει να εξαφανιστεί , ενώ η Τρίτη και η τέταρτη παρουσιάζουν τα τελευταία χρόνια αλματώδη εξέλιξη. Η εφαρμογή των επιφανειακών μεθόδων άρδευσης προϋποθέτει τη συστηματική ισοπέδωση των κτημάτων για την καλύτερη και ομοιόμορφη διανομή του αρδευτικού νερού.

Οι μέθοδοι άρδευσης , εκτός από τον έλεγχο του νερού στο κτήμα , καθορίζουν και τη χάραξη του δικτύου διανομής του νερού. Γενικά η χάραξη ενός αρδευτικού δικτύου πρέπει να γίνεται από τα κάτω προς τα πάνω, δηλαδή από το κτήμα προς την υδροληψία, ενώ αντίθετη χάραξη μπορεί να οδηγήσει, και οδήγησε πολλές φορές, σε σοβαρά σφάλματα, με αποτέλεσμα την αδυναμία εφαρμογής του νερού.

1.3 Κριτήρια επιλογής του συστήματος άρδευσης

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος άρδευσης εντάσσεται μέσα στη γενικότερη προσπάθεια του ανθρώπου για ορθολογική χρήση του νερού σε κάθε τομέα χρήσης του (ύδρευση, βιομηχανία, άρδευση κλπ.), ώστε να αποφεύγεται η σπατάλη του και ταυτόχρονα να επιτυγχάνονται και τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Μεταξύ των τομέων κατανάλωσης νερού, την πρώτη θέση κατέχει, με τις αρδεύσεις, η γεωργία και γι' αυτό κάθε βελτίωση στον τομέα αυτό ερμηνεύεται σε όφελος μεγάλων ποσοτήτων νερού. Εδώ θα

πρέπει να διευκρινισθεί ότι τα φυτά, για να αναπτυχθούν φυσιολογικά, έχουν ανάγκη από ορισμένη ποσότητα νερού, η οποία πρέπει να τους δοθεί ανεξάρτητα από το σύστημα άρδευσης που θα εφαρμοστεί. Επομένως, όταν μιλάμε για όφελος, σε καμιά περίπτωση δεν εννοούμε περιορισμό των αναγκών των φυτών σε νερό. Το όφελος συνδέεται άμεσα με τον καλύτερο τρόπο μεταφοράς και διανομής του νερού, ώστε να περιορίζονται στο ελάχιστο δυνατόν οι αναπόφευκτες απώλειες νερού (εξάτμιση, βαθιά διήθηση κ.λπ.).

Αυτό σημαίνει κατάλληλη εκλογή και σωστή λειτουργία του συστήματος άρδευσης. Βέβαια, θα πρέπει να αναφερθεί ότι όπως όλες οι άλλες επιχειρήσεις έτσι και οι γεωργικές έχουν ως τελικό σκοπό το κέρδος και γι' αυτό το κόστος του συστήματος παίζει σοβαρό ρόλο στην τελική απόφαση της επιλογής του συστήματος. Οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του συστήματος άρδευσης είναι: το κλίμα, το έδαφος, τα φυτά και ο τρόπος καλλιέργειας τους, οι διαθέσιμες ποσότητες νερού, το διαθέσιμο εργατικό και τεχνικό δυναμικό, το επίπεδο ανάπτυξης του αγρότη και το κόστος των έργων.

1.4 Περιγραφή μεθόδων άρδευσης

1.4.1 Επιφανειακή άρδευση

Τις μεθόδους επιφανειακής άρδευσης τις χωρίζουμε σε δύο μεγάλες ομάδες:

- a) Τις μεθόδους που αποβλέπουν στο να διηθηθεί το νερό μέσα στο έδαφος κατά το χρόνο της παραμονής του πάνω σ' αυτό και που ονομάζονται γενικά μέθοδοι άρδευσης με κατάκλυση.
- b) Τις μεθόδους που αποβλέπουν στο να διηθηθεί το νερό μέσα στο έδαφος κατά το χρόνο της ροής του πάνω σ' αυτό και που ονομάζονται γενικά μέθοδοι άρδευσης με ροή.

Η άρδευση με κατάκλυση φαίνεται ότι είναι η αρχαιότερη μέθοδος εφαρμογής του αρδευτικού νερού. Το νερό διοχετεύεται προς τα κτήματα ανεξέλεγκτο και εξαπλώνεται σε πολύ εκτεταμένες επιφάνειες. Η ανεξέλεγκτη αυτή εφαρμογή του νερού έχει ως συνέπεια :

- a) Την απώλεια μεγάλων ποσοτήτων νερού, κυρίως με βαθιά διήθηση.
- b) Την ανομοιόμορφη κατανομή του νερού πάνω στην αρδευόμενη επιφάνεια.
- c) Την παραμονή του νερού στο έδαφος πέρα από το ανεκτό για τα φυτά χρονικό όριο.
- d) Τη δημιουργία ευνοϊκού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη υδροχαρών ζιζανίων.

Σήμερα οι μέθοδοι άρδευσης με κατάκλυση έχουν περιορισμένη εφαρμογή σε εκείνες τις περιπτώσεις που για αγροτεχνικούς λόγους είναι απαραίτητη η εφαρμογή του νερού με κατάκλυση για την ταυτόχρονη επίτευξη και άλλων στόχων όπως είναι:

- α. Οι υδρολιπάνσεις ή η υδραυλική επίχωση γαιών, όταν το νερό, με το οποίο πρόκειται να γίνει η άρδευση, έχει αιωρούμενα κατάλληλα συστατικά.
- β. Η απόπλυση αλατούχων ή αλατουχο αλκαλιωμένων εδαφών, κατά την οποία εφαρμόζονται μεγάλες ποσότητες νερού.

Επίσης αποκλειστική χρήση της επιφανειακής άρδευσης γίνεται στην ρυζοκαλλιέργεια, η οποία είναι καλλιέργεια που απαιτεί σχεδόν συνεχή κατάκλυση των εδαφών με νερό. Το έδαφος του αγρού με την κατασκευή μικρών αναχωμάτων διαμορφώνεται κατά περίπτωση σε μικρές ή μεγάλες λεκάνες. Το νερό διοχετεύεται και κατακλύζει γρήγορα ολόκληρη την επιφάνεια των λεκανών και παραμένει μέσα σ' αυτές μέχρι που να απορροφηθεί τελείως από το έδαφος.

Στην άρδευση με κατάκλυση χρειάζονται μεγάλες παροχές νερού.

Κατά την άρδευση με ροή το αρδευτικό νερό ρέει, υπό κλίση επί της επιφάνειας του εδάφους, από το ψηλότερο σημείο του αγρού ως το χαμηλότερο, σαν ένα λεπτό στρώμα νερού. Το νερό ρέει επί τόσο χρόνο, όσος χρειάζεται να υγρανθεί το έδαφος και να φτάσει στον επιθυμητό βαθμό η υγρασία στο βάθος του ριζοστρώματος. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται και άρδευση με βαθμό διάχυση, γιατί το νερό από τη διώρυγα εφαρμογής ξεχύνεται στην έκταση που πρόκειται να αρδευτεί. Παλιότερα εφαρμοζόταν η ελεύθερη διάχυση κατά την οποία το νερό παροχετευόταν ελεύθερα πάνω σ' ολόκληρη την επιφάνεια που ήταν για άρδευση. Η μέθοδος αυτή, που συνηθίζεται ακόμη και σήμερα σε μη προηγμένες περιοχές, παρουσιάζει αδυναμία εφαρμογής της δόσης που χρειάζεται για την άρδευση και αδυναμία ελέγχου στην ομοιόμορφη κατανομή του αρδευτικού νερού.

Για τον έλεγχο της ροής του νερού χρησιμοποιείται σήμερα ή η περιορισμένη διάχυση κατά την οποία το νερό διαχέεται επί των γαιών περιορισμένο μέσα σελωρίδες μεταξύ παράλληλων αναχωμάτων, ρέει μέσα σε αυτά σε λεπτό στρώμα, καλύπτει την προς άρδευση επιφάνεια και διηθείται μέσω αυτής, ή η άρδευση με αυλάκια, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση της προηγούμενης καθότι το νερό ρέει ακόμη περιορισμένο μέσα στα αυλάκια, διαποτίζει όχι μόνο την επιφάνεια πάνω στην οποία ρέει, αλλά με διήθηση και την έκταση που υπάρχει ανάμεσα στα αυλάκια. Ανάμεσα στις ειδικότερες μεθόδους άρδευσης υπάρχουν διαφορές ως προς τον τρόπο άρδευσης, σε κάθε χώρα χωριστά, ανάλογα με τις ειδικές συνθήκες κάθε μιας, την έκταση των αγροτεμαχίων, των καλλιεργητικών συνθηκών, αλλά και των τοπικών συνθηκών.

1.4.2 Υπόγεια άρδευση

Η υπόγεια άρδευση ή υπάρδευση συνίσταται στην τεχνητή ρύθμιση της στάθμης του υπόγειου νερού (με προσθήκη νερού) σε κατάλληλο υψόμετρο ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη αναλογία νερού και αέρα μέσα στο ριζόστρωμα των καλλιεργειών. Έτσι, η υπόγεια άρδευση μπορεί να θεωρηθεί σαν το αντίστροφο της στράγγισης.

Η υπόγεια άρδευση είναι πολύ διαδεδομένη σε βροχερές περιοχές γιατί συνδυάζεται άριστα με το υπάρχον σύστημα στράγγισης των νερών της βροχής. Έτσι, κατά τις περιόδους ξηρασίας, όταν η εξάτμιση είναι μεγαλύτερη από τη βροχόπτωση, εμποδίζεται η ροή του νερού στις τάφρους στράγγισης και με αυτό τον τρόπο ρυθμίζεται το ύψος της υπόγειας στάθμης, για τον εφοδιασμό των καλλιεργειών με νερό. Το σύστημα αυτό είναι πολύ διαδεδομένο στην Ολλανδία όπου το κλίμα, η τοπογραφία και τα αξιοποιηθέντα από τη θάλασσα εδάφη (Polders) απαίτησαν την κατασκευή στραγγιστικών τάφρων. Συνήθως, τα Polders της Ολλανδίας είναι 2 - 5 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Κάθε κίνδυνος αλάτωσης των εδαφών

(μόνιμη απειλή για τα Polders) κατά την διάρκεια της υπάρδευσης , όπου έχουμε ανοδική κίνηση του νερού, αντισταθμίζεται από την προς τα κάτω κίνηση του νερού κατά την βροχερή περίοδο. Καλό είναι να σημειωθεί ότι η υπόγεια άρδευση γίνεται είτε με υπόγειες σωληνώσεις είτε με διάτρητες σωληνώσεις από τις οποίες το νερό διαβρέχει το έδαφος με βαρύτητα, τριχοειδή ανύψωση και διάχυση.

1.4.2.1 Πλεονεκτήματα υπόγειας άρδευσης

- a) Είναι αποτελεσματική σε ξηρά εδάφη με μικρή υδατοϊκανότητα και υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα.
- b) Οι απαιτήσεις σε εργατικά χέρια είναι πολύ μικρές.
- c) Η ανάπτυξη αγριόχορτων είναι ελάχιστη ώστε και τα έξοδα καταπολεμήσεως των είναι ελάχιστα.
- d) Δεν χρειάζονται ισοπεδώσεις, αυλακώσεις κ.λπ.
- e) Η εξάτμιση νερού είναι ελάχιστη.
- f) Η ανάπτυξη των καλλιεργειών είναι καλή

1.4.2.2 Μειονεκτήματα υπόγειας άρδευσης

- a) Τα γειτονικά κτήματα επηρεάζονται.
- b) Η ποιότητα του νερού πρέπει να είναι καλή για να αποφευχθούν προβλήματα αλάτωσης των εδαφών.
- c) Χρειάζεται εντατικότερη στράγγιση και απόπλυση των εδαφών για τον έλεγχο της περιεκτικότητας των σε άλατα.
- d) Η βλάστηση των σπόρων δεν είναι ομοιόμορφη εάν ο έλεγχος της υπόγειας στάθμης είναι ακανόνιστος

1.4.3 Άρδευση με καταιονισμό

Η μέθοδος εφαρμογής του νερού σε όλη την επιφάνεια του αγρού υπό τύπο ψεκασμού, δηλαδή κατά τρόπο που προσομοιάζει με τις φυσικές βροχοπτώσεις, ονομάζεται άρδευση με καταιονισμό.

Ο καταιονισμός αποτελεί τον φυσικότερο τρόπο εφαρμογής του νερού στο χωράφι. Κατά απομίμηση προς την φυσική βροχή, με τους εκτοξευτήρες , και την κατάλληλη διάταξη τους, προσπαθούμε να πετύχουμε, κατά το δυνατόν, ομοιόμορφη διαβροχή του χωραφιού με νερό, που διηθείται στο έδαφος κατακόρυφα υπό ακόρεστες συνθήκες ροής.

Ο καταιονισμός προσαρμόζεται για άρδευση όλων των εμπορεύσιμων καλλιεργειών, κάτω από μεγάλη ποικιλία εδαφικών συνθηκών.

Ιδιαίτερα, η μέθοδος συνιστάται όταν η διαθέσιμη παροχή άρδευσης είναι σχετικά μικρή και όταν το έδαφος είναι πολύ διαπερατό , ανομοιόμορφο, αβαθές, με υψηλή υπόγεια στάθμη, μεγάλη κλίση και ανώμαλη τοπογραφία.

Η άρδευση με καταιονισμό, παρόλο ότι θεωρείται σήμερα σαν μία σύγχρονη μέθοδος άρδευσης, είναι γνωστή από παλαιότερα χρόνια.

Τα παλαιότερα συγκροτήματα άρδευσης με καταιονισμό αποτελούνται, κατά το πλείστον, από μόνιμες σωληνώσεις σιδήρου ή χυτοσιδήρου και γενικά από βαριά υλικά, τα οποία καθιστούσαν ασύμφορη την επέκταση της μεθόδου για την άρδευση των συνήθων καλλιεργειών.

Η κατά τα τελευταία χρόνια ανάπτυξη των περιστροφικών εκτοξευτήρων και των ελαφρών πλαστικών σωλήνων, συντέλεσε στη χρησιμοποίηση της μεθόδου σε μεγάλη κλίμακα.

1.4.3.1 Πλεονεκτήματα άρδευσης με καταιονισμό

Κάθε μία μέθοδος άρδευσης, όταν εξετάζεται συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους, παρουσιάζει πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα.

Ίσως τα πλεονεκτήματα να είναι αριθμητικά περισσότερα από τα μειονεκτήματα, σημασία όμως έχει η βαρύτητα του καθενός από αυτά στις εκάστοτε εδαφολογικές, κλιματολογικές και γενικά οικολογικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Μπορεί ένα και μόνο πλεονέκτημα του καταιονισμού να είναι αποφασιστικό σε ορισμένες περιοχές, οπότε η άρδευση με αυτό το τρόπο να αποτελεί κατάσταση ανάγκης και απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή του αρδευτικού νερού. Σε άλλες περιπτώσεις, προκειμένου να επιλεγεί το ένα ή το άλλο σύστημα άρδευσης, θα πρέπει να σταθμιστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε συστήματος σε σχέση με το αντίστοιχο αναμενόμενο οικονομικό αποτέλεσμα από το έργο.

Τα σπουδαιότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου άρδευσης με καταιονισμό είναι τα εξής:

a) Δυνατότητα εφαρμογής των αρδεύσεων σε εδάφη που δεν προσφέρονται για επιφανειακή άρδευση.

Είναι δυνατή η εφαρμογή της άρδευσης σε ορισμένα εδάφη τα οποία λόγω της μηχανικής σύστασης τους ή της τοπογραφικής διαμόρφωσης της επιφάνειάς τους, δεν είναι δυνατό να αρδευτούν με μεθόδους επιφανειακής άρδευσης. Τέτοια εδάφη είναι αυτά που έχουν κλίση μεγαλύτερη του 4-5%, τα πολύ ελαφρά εδάφη με βασική διηθητικότητα μεγαλύτερη των 75mm την ώρα και γενικά τα εδάφη όπου τα μήκη διαδρομής του νερού που επιτυγχάνονται είναι κάτω των 100m.

b) Έργο άμεσης απόδοσης.

Αξιοποιείται άμεσα η επένδυση χρημάτων και μπορούμε να προλάβουμε αποτελεσματικά καταστάσεις άμεσης ανάγκης. Τα δίκτυα καταιονισμού κατασκευάζονται ταχύτατα επειδή τα υλικά κατασκευής τους διαθέτονται προκατασκευασμένα από τις βιομηχανίες.

c) Οικονομία αρδευτικού νερού .

Στην άρδευση με καταιονισμό οι απώλειες νερού οφείλονται κυρίως στην εξάτμιση και υπολογίζονται σε 10 -15% του νερού εφαρμογής ενώ παράλληλα έχουμε μη γενικές απώλειες λόγω εξάτμισης κατά την μεταφορά και διανομή του νερού. Αντίστοιχα οι απώλειες των μεθόδων επιφανειακής άρδευσης από εξάτμιση, βαθιά διήθηση ή επιφανειακή απορροή, κάτω από συνήθεις συνθήκες εδάφους κυμαίνονται σε 30 - 50%, ενώ είναι επίσης θεαματικές οι απώλειες λόγω εξάτμισης κατά τη μεταφορά του νερού. Ο καταιονισμός έχει, επομένως, βαθμό αποδόσεως άρδευσης 85-90% ενώ οι επιφανειακές

μέθοδοι άρδευσης έχουν βαθμό αποδόσεως 50-70%. Με τον καταιονισμό λοιπόν, μπορούμε με την ίδια ποσότητα νερού να αρδεύσουμε πολύ μεγαλύτερη έκταση.

d) Δεν καταστρέφεται καλλιεργήσιμη έκταση.

Ενώ στα δίκτυα επιφανειακής άρδευσης, ποσοστό 12 ή 14% της συνολικής έκτασης καταλαμβάνεται από τα έργα, στα δίκτυα καταιονισμού δεν απαιτείται εκσκαφή διωρύγων, αλλά προσωρινή εκσκαφή για την τοποθέτηση των υπογείων αγωγών, η οποία αποκαθίσταται αμέσως μετά την δοκιμαστική λειτουργία του αγωγού.

e) Δεν απαιτείται συστηματοποίηση των γαιών.

Σε όλες τις μεθόδους επιφανειακής άρδευσης, η επιτυχία της άρδευσης εξαρτάται κατά 90 % από την επιμελημένη ισοπέδωση των αρδευόμενων γαιών. Στον καταιονισμό δεν απαιτείται λεπτομερής ισοπέδωση των γαιών η οποία αφενός μεν είναι δαπανηρή, αφ' ετέρου δε απαιτεί πολύ χρόνο, ιδίως όταν πρόκειται να εφαρμοστεί σε αρδευτικά δίκτυα μεγάλων εκτάσεων, όπως είναι τα δίκτυα συλλογικής άρδευσης.

f) Αξιοποίηση μικρών και διεσπαρμένων παροχών.

Μικρές παροχές νερού είναι πρακτικά αχρησιμοποίητες λόγω των απωλειών κατά τη διαδρομή του νερού στα δίκτυα επιφανειακής άρδευσης. Με τον καταιονισμό, επειδή το νερό διοχετεύεται με κλειστούς αγωγούς, οι απώλειες μεταφοράς μηδενίζονται.

g) Χορήγηση του νερού υπό φυσική μορφή.

Το αρδευτικό νερό κατά τη διαδρομή του στον ατμοσφαιρικό αέρα, πριν φτάσει στις καλλιέργειες, θερμαίνεται και προσλαμβάνει άζωτο και οξυγόνο τα οποία συμπαρασύρει στο έδαφος. Επίσης ξεπλένει τα φύλλα των φυτών από τη σκόνη, τα επιβλαβή έντομα, και τα δηλητηριώδη αμμωνιακά άλατα της αποσύνθεσης.

h) Δεν καταστρέφεται η δομή του εδάφους

Από την αναπόφευκτη υπεράρδευση, κατά τις επιφανειακές μεθόδους, καταστρέφεται η δομή του εδάφους. Τα λεπτόκοκκα συστατικά του εδάφους παρασύρονται και φράσσουν τους πόρους του εδάφους με συνέπεια τη δημιουργία μονοκοκκικής δομής του εδάφους. Ο αέρας εκτοπίζεται από τους πόρους του εδάφους. Μετά το τέλος της άρδευσης σχηματίζεται επιφανειακή "κρούστα" στο έδαφος, η οποία εμποδίζει την είσοδο του αέρα για την αναπνοή των ριζών και την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Έτσι μετά από κάθε επιφανειακή άρδευση χρειάζεται σκάλισμα. Με τον καταιονισμό, και μάλιστα με τη χρησιμοποίηση μικρών εκτοξευτήρων, μπορούμε να ρυθμίσουμε την άρδευση ανάλογα με την διηθητικότητα του εδάφους και να αποφύγουμε όλες τις παραπάνω δυσμενείς συνέπειες.

i) Αποφεύγονται εστίες ζιζανίων.

Κατά την επιφανειακή άρδευση αναπτύσσονται εστίες ζιζανίων τόσο στις όχθες των διωρύγων και των τάφρων, όσο και μέσα στα χωράφια. Με τον καταιονισμό και επειδή υπάρχει δυνατότητα άρδευσης και των νεαρών φυτών, επιταχύνεται η ανάπτυξη τους με συνέπεια την ταχεία κάλυψη της επιφανείας του εδάφους από τα καλλιεργούμενα φυτά τα οποία σκιάζουν το έδαφος και εμποδίζουν την ανάπτυξη των

ζιζανίων τα οποία πλην των άλλων απομυζούν τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους και χρησιμεύουν σαν μεσάζοντες εκκόλαψης επιβλαβών εντόμων.

j) Ελάττωση των εργατικών άρδευσης.

Στα σύγχρονα δίκτυα καταιονισμού, η παρακολούθηση της άρδευσης είναι περιττή, και μάλιστα, όταν το σύστημα είναι μόνιμο, η εργατική δαπάνη τείνει να μηδενιστεί.

k) Ευκολία χρήσεως του δικτύου.

Ο τρόπος χρήσης του συγκροτήματος καταιονισμού γίνεται εύκολα κατανοητός, σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, και από τους πιο αδαείς χωρικούς, ενώ αντίθετα η πλειονότητα των γεωργών, παρόλη την πείρα μίας ολόκληρης ζωής, δεν αντιλαμβάνεται την ορθή χρήση της μιας ή της άλλης επιφανειακής μεθόδους άρδευσης

1.4.3.2 Μειονεκτήματα άρδευσης με καταιονισμό

Έναντι των παραπάνω πλεονεκτημάτων, η άρδευση με καταιονισμό παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία πολλές φορές περιορίζουν την εφαρμογή της. Τα σπουδαιότερα μειονεκτήματα είναι:

a. Μεγάλη δαπάνη για την αρχική εγκατάσταση.

Το κόστος κατασκευής του δικτύου μεταφοράς του νερού καθώς επίσης και το κόστος των διαφόρων εξαρτημάτων των δικτύων καταιονισμού είναι υψηλό συγκρινόμενο με τις δαπάνες κατασκευής δικτύων επιφανειακής άρδευσης. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η μαζική παραγωγή εξαρτημάτων καταιονισμού, που γίνεται σήμερα, έχει αποτέλεσμα την πτώση των τιμών τους. Παράλληλα, για αποφυγή απωλειών νερού κατά την μεταφορά, τα επιφανειακά δίκτυα κατασκευάζονται επενδεδυμένα. Έτσι υπάρχουν περιπτώσεις όπου η δαπάνη κατασκευής δικτύων επιφανειακής άρδευσης, πολύ περισσότερο μάλιστα όταν για τα επιφανειακά δίκτυα είναι απαραίτητη η συστηματοποίηση.

b. Αυξημένα έξοδα λειτουργίας

Κατά την κατασκευή δικτύων επιφανειακής άρδευσης γίνεται εκμετάλλευση της φυσικής τοπογραφίας του εδάφους και η ροή του νερού επιτυγχάνεται με τη βαρύτητα χωρίς να απαιτείται άντληση. Στον καταιονισμό, με εξαίρεση μεμονωμένες περιπτώσεις όπου η πηγή υδροδότησης βρίσκεται αρκετά υψηλά, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη πίεση λειτουργίας του συστήματος, σε όλες τις άλλες περιπτώσεις απαιτείται δαπάνη λειτουργίας αντλητικού συγκροτήματος για την εξασφάλιση της υπόψη πίεσης.

c. Ανομοιόμορφη κατανομή της βροχής λόγω του ανέμου.

Ο άνεμος συμπαρασύρει τα σταγονίδια της βροχής κατά την πνοή του και προκαλεί ανομοιόμορφη άρδευση του αγρού. Με ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 2,8 m/sec εμφανίζονται συνθήκες ανομοιόμορφης διασποράς του νερού. Για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 4,5 m/sec, ή όταν ο αέρας είναι πολύ ξηρός και υπόκειται σε εντατική ηλιακή ακτινοβολία, δεν ενδείκνυται η άρδευση με καταιονισμό και πρέπει να αναστέλλεται.

d. Μηχανικές βλάβες συσκευών ή εξαρτημάτων δικτύου.

Στα δίκτυα καταιονισμού είναι αναγκαία η τοποθέτηση διαφόρων συσκευών και εξαρτημάτων για την σωστή λειτουργία τους, όπως αντλιών, δικλίδων, αεροεξαγωγών, ρυθμιστών πιέσεως και παροχής, βαλβίδων (αντιπληγματικών ή αντεπιστροφής), φίλτρων, εκτοξευτήρων. Η μη κανονική λειτουργία των παραπάνω, επιδρά δυσμενώς στην κανονική λειτουργία του δικτύου, ή και αναστέλλει την άρδευση.

e. Ποιότητα αρδευτικού νερού.

Στην άρδευση με καταιονισμό είναι αδύνατη η χρήση νερού υψηλής αλατότητας γιατί προκαλούνται εγκαύματα στα φύλλα των φυτών. Επίσης η χρήση νερού με μεγάλη ποσότητα φερτών υλών προκαλεί αποφράξεις των φίλτρων καθώς επίσης και γρήγορη φθορά των εκτοξευτήρων.

1.4.4 Στάγδην άρδευση

Στην μέθοδο άρδευσης με σταγόνες ή στάγδην άρδευση, το νερό εφαρμόζεται στα φυτά που πρόκειται να αρδευτούν με την μορφή σταγόνων και με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε φυτό χωριστά να εφοδιάζεται με την απαραίτητη για την ανάπτυξη του υγρασία. Η υγρασία με την μορφή σταγόνων παρέχεται στο ριζόστρωμα των καλλιεργειών συνεχώς με την βοήθεια ειδικών σταλακτήρων, που είναι τοποθετημένοι σε αποστάσεις που θέλουμε πάνω σε σωλήνες από πολυαιθυλένιο, απλωμένες επιφανειακά, συνήθως κατά μήκος των γραμμών φύτευσης των φυτών ή των δένδρων.

Κατά τους Ισραηλινούς Haley ,Boaz, Shani, Dan (Ευρωπαϊκό συνέδριο στάγδην άρδευσης, Βουκουρέστι 1972), η άρδευση με σταγόνες αποτελεί μια τεχνική που προορίζεται να θέσει το νερό και τα λιπάσματα κατευθείαν στη διάθεση των ριζών με διανεμητές ειδικά σχεδιασμένους και υπολογισμένους για πολύ μικρές παροχές, έτσι ώστε η κίνηση του νερού μισά στο έδαφος να είναι τρισδιάστατη και η τάση του να διατηρείται συνεχώς σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Κατά τους Αμερικανούς Marsh, Branson, Gustavson και Davis (2^ο Διεθνές Συνέδριο στάγδην άρδευσης, Καλιφόρνια 1974), άρδευση με σταγόνες είναι η διανομή του νερού με μικρές ποσότητες, σε συχνά διαστήματα, από διανεμητές που ονομάζονται σταλακτήρες και τοποθετούνται κατά προκαθορισμένα διαστήματα στους σωλήνες διανομής. Η παροχή των σταλακτήρων πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή, ώστε η κίνηση του νερού στην επιφάνεια του εδάφους να είναι αρκετά περιορισμένη και να μην δημιουργείται «λίμνασμα νερού».

Από πλευράς ορολογίας η άρδευση με σταγόνες χαρακτηρίζεται από τους Ελληνικούς όρους άρδευση στάλα-στάλα, ή στάγδην άρδευση και από τους ξένους drip ή trickle irrigation, av govttē a govttē, irrigazione a goccia, riego por goteo ή riego gota-gota.

Υπάρχει επίσης και πλήθος εμπορικών ονομασιών που αναφέρονται στην άρδευση στάγδην, όπως: water miser, water saver, microtrickle, micropor, irri-drip, blass system κ.α.

1.4.4.1 Πλεονεκτήματα στάγδην άρδευσης

Αύξηση των αποδόσεων

Η εύκολη απορρόφηση των υδατικών διαλυμάτων και ο συνεχής εφοδιασμός του ριζοστρώματος των φυτών με θρεπτικά στοιχεία ιδίως όταν στο αρδευτικό νερό διαλύονται λιπάσματα , αποτελεί βασικό παράγοντα για την αύξηση των αποδόσεων με την μέθοδο αυτή. Έπειτα , κατά το πότισμα με την μέθοδο αυτή , μια λωρίδα εδάφους μεταξύ των φυτών παραμένει ξερή με αποτέλεσμα , όπως τουλάχιστον φαίνεται , να διατίθεται μεγαλύτερη ηλιακή ενέργεια για την διαπνοή και αύξηση των φυτών, παρά με όποια άλλη μέθοδο άρδευσης στην οποία υγραίνεται όλη σχεδόν η επιφάνεια του εδάφους και ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ενέργειας διατίθεται για την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του εδάφους. Πειράματα και εφαρμογές σε πολλές χώρες του κόσμου απέδειξαν ότι με την άρδευση με σταγόνες η αύξηση των αποδόσεων κυμαίνεται συνήθως από 25-50 % για τις δεινρώδεις καλλιέργειες και 30 -70 % για τις κηπευτικές. Σε πολλές δε περιπτώσεις πειραμάτων , παρατηρήθηκε εκτός από τις υψηλές αποδόσεις, καλλίτερη ανάπτυξη των φυτών, καλλίτερη ποιότητα και μεγαλύτερη πρωιμότητα.

Ευνοϊκές συνθήκες ανάπτυξης και απόδοσης των φυτών

Η συχνή και με βραδύ ρυθμό χορήγηση του νερού με μικρές παροχές δεν εκτοπίζει τον αέρα μέσα από το έδαφος και έτσι δημιουργούνται ευνοϊκότερες συνθήκες για το ριζικό σύστημα των φυτών. Κατά την άρδευση γεμίζουν με νερό οι μικροπόροι του εδάφους, ενώ οι μακροπόροι παραμένουν γεμάτοι με αέρα με αποτέλεσμα η ροή να είναι ακόρεστη και το νερό να κατέρχεται με τριχοειδή κίνηση. Τα φυτά δεν παθαίνουν το λεγόμενο stress από απότομες μεταβολές της εδαφικής υγρασίας κάτω από τις οποίες αναγκάζονται να περιορίσουν τη διαπνοή τους και κατ' αυτόν τον τρόπο να δημιουργήσουν προϊόντα χονδρόφλουδα κατώτερης ποιότητας.

Η υδατοπεριεκτικότητα διατηρείται σε υψηλά επίπεδα κοντά στην υδατοϊκανότητα και η τάση σε αντίστοιχα χαμηλά επίπεδα που δεν υπερβαίνουν τα 30 μέχρι 50 centibars .

Γενικά, όσο μικρότερη είναι η συχνότητα των αρδεύσεων, δηλαδή μεσολαβεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μεταξύ αυτών, τόσο υψηλότερη είναι και η τάση, που εκφράζει τη δύναμη συγκράτησης του νερού από τους κόκκους του εδάφους.

Είναι σήμερα παραδεκτό, ότι σε χαμηλότερα επίπεδα της εδαφικής τάσης της υγρασίας, (γύρω στο 1/3 της ατμόσφαιρας), εξασφαλίζεται ευκολότερη πρόσληψη του νερού και των θρεπτικών στοιχείων και δημιουργούνται ευνοϊκότερες συνθήκες για την ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών.

Οικονομία αρδευτικού νερού

Επειδή με την μέθοδο αυτή ποτίζεται μια μικρή έκταση εδάφους γύρω από το φυτό, υπάρχουν πολύ ελαττωμένες απώλειες από την εξάτμιση. Το νερό πηγαίνει κατευθείαν στο ριζόσπρωμα και δεν παρασύρεται από τον αέρα ώστε να εξατμίζεται πριν πέσει στο έδαφος όπως γίνεται στην περίπτωση της τεχνητής βροχής.

Επίσης δεν υπάρχουν απώλειες από βαθιά διήθηση όπως στην επιφανειακή άρδευση , η δε ποσότητα του χορηγούμενου νερού είναι μικρή . Γενικά υπολογίζεται ότι η οικονομία νερού σε σχέση με την τεχνητή βροχή ανέρχεται σε 20 - 25 % , σε σχέση δε με την επιφανειακή άρδευση , σε 50 % περίπου.

Εκτός αυτών με την μέθοδο αυτή δεν ποτίζονται υποχρεωτικά και οι εκτάσεις που βρίσκονται έξω από τα όρια του χωραφίου όπως συμβαίνει με την τεχνητή βροχή.

Χαμηλό κόστος αντλητικού συγκροτήματος και δικτύου.

Αφού η ποσότητα νερού ανά μονάδα επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου (παροχή) είναι μικρή και η πίεση λειτουργίας είναι επίσης μικρή , η απαιτούμενη ισχύς των συγκροτημάτων είναι μικρότερη από τις άλλες μεθόδους. Έτσι τα μικρά συγκροτήματα είναι πιο οικονομικά , προσφέρουν δε ένα πλεονέκτημα από πλευράς κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, το ότι κατά την λειτουργία τους με μικρή ισχύ και μεγάλο χρόνο λειτουργίας, ιδίως τις νυκτερινές ώρες δεν δημιουργούν ανεπιθύμητες και αντιοικονομικές αιχμές στα δίκτυα της ΔΕΗ.

Εκτός αυτών επειδή η παροχή νερού είναι μικρή , οι σωλήνες μεταφοράς και διανομής των δικτύων μπορεί να έχουν μικρότερες διαμέτρους και επομένως μικρότερο κόστος προμηθείας από ότι θα είχαν αν η άρδευση γίνονταν με τεχνητή βροχή.

Αξιοποίηση μικρών παροχών και χρησιμοποίηση χαμηλών πιέσεων.

Το πλεονέκτημα αυτό έχει ιδιαίτερη αξία σε περιοχές που το νερό είναι λίγο και δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθεί με καμιά άλλη μέθοδο. Με ορισμένη παροχή , είναι δυνατό κατά την άρδευση με σταγόνες , να αρδευτεί μεγαλύτερη έκταση από ό,τι με τα συμβατικά συστήματα άρδευσης. Ακόμη μπορεί να εφαρμοστεί το νυκτερινό πότισμα και να αξιοποιηθεί το νερό καλύτερα, όταν στις άλλες μεθόδους είναι αδύνατο και περιορίζεται αναγκαστικά ο συνολικός ημερήσιος χρόνος άρδευσης σε 16-18 ώρες .

Η πίεση λειτουργίας των συγκροτημάτων είναι σημαντικά μειωμένη απ' ότι στα συγκροτήματα της τεχνητής βροχής. Είναι δυνατόν ακόμη και μια υπερυψωμένη δεξαμενή να επαρκέσει για να λειτουργήσει το συγκρότημα της άρδευσης με σταγόνες. Υπάρχουν πορώδεις σωλήνες και ειδικά μπεκ λεπτοροής που απαιτούν λιγότερο από μισή ατμόσφαιρα.

Δυνατότητα αξιοποίησης αλατούχων νερών.

Τα συστήματα άρδευσης με σταγόνες δίνουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για την άρδευση των καλλιεργειών αλατούχα νερά γιατί:

- 1) Με την απευθείας χορήγηση νερού στο έδαφος χωρίς να βρέχεται το φύλλωμα των φυτών , αποφεύγονται ζημιές στα φύλλα από την αυξημένη οσμωτική πίεση που δημιουργείται με την αύξηση της συγκέντρωσης αλάτων καθώς το νερό εξατμίζεται από το βρεχόμενο φύλλωμα.
- 2) Με τη μεγάλη συχνότητα των αρδεύσεων η υδατοπεριεκτικότητα του εδάφους βρίσκεται σε συνεχώς υψηλά επίπεδα με αποτέλεσμα η συγκέντρωση των αλάτων στο εδαφικό διάλυμα και στη συνέχεια η οσμωτική τάση στο έδαφος να διατηρείται συνεχώς σε χαμηλά επίπεδα, το δε ριζόστρωμα να βρίσκεται σε ανεκτές συνθήκες τάσης. Αυτό εξασφαλίζεται περισσότερο με την συχνότητα των ποτισμάτων .

Ανεξαρτοποίηση της άρδευσης από τον άνεμο

Η χορήγηση του νερού πάνω ή πολύ κοντά στη επιφάνεια του εδάφους , ανεξαρτοποιεί την εφαρμογή από τον άνεμο και δεν υπόκειται στη δυσμενή επίδραση αυτού, όπως συμβαίνει με την τεχνητή βροχή.

Άρδευση επικλινών και ανωμάτων εδαφών.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε επικλινή και ανώμαλα εδάφη , τα οποία θα ήταν αδύνατο , ή πολύ δαπανηρό , να ποτιστούν με άλλες μεθόδους.

Οικονομία εργατικών

Τα δίκτυα άρδευσης με σταγόνες , ως μόνιμα δίκτυα , δεν χρειάζονται ημερομίσθια για την λειτουργία τους . Χρειάζεται μόνο μια περιοδική επιθεώρηση των δικτύων για να εξακριβωθεί αν υπάρχουν βλάβες και να αποκατασταθούν.

Μείωση των ζιζανίων

Όπως έχει αναφερθεί , το έδαφος με την μέθοδο σταγόνα-σταγόνα βρέχεται κατά τμήματα, που αποτελούν μέρος της όλης έκτασης , την οποία καταλαμβάνει η καλλιέργεια . Κατά συνέπεια τα ζιζάνια αναπτύσσονται στα τμήματα αυτά του εδάφους και εύκολα μπορούν να ελεγχθούν με οικονομικά ζιζανιοκτόνα και πολλές φορές , εφόσον υπάρχουν οι προϋποθέσεις , η καταπολέμηση γίνεται μέσου του ίδιου δικτύου.

Ευκολία λίπανσης

Υπάρχει δυνατότητα να χορηγηθούν αρκετά λιπάσματα διαλυμένα μέσα στο αρδευτικό νερό με κατάλληλους υδρολιπαντήρες.

Έτσι και οικονομία εργατικών γίνεται και καλλίτερη αποτελεσματικότητα της λίπανσης επιτυγχάνεται, αφού το λίπασμα χορηγείται κατευθείαν στο ριζόστρωμα.

Εύκολη κυκλοφορία μέσα στο χωράφι.

Η διατήρηση σε ξερή κατάσταση της λωρίδας μεταξύ των φυτών επιτρέπει την κυκλοφορία για την εκτέλεση διαφόρων καλλιεργητικών εργασιών κατά την περίοδο της άρδευσης, όπως συγκομιδή καρπών, διάφορες μεταφορές κ.λπ.

Έλεγχος ασθενειών και εντόμων.

Με τον τρόπο που χορηγείται το νερό στα φυτά χωρίς αυτά να βραχούν στο φύλλωμα, δεν δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη των μυκητολογικών και εντομολογικών προσβολών . Επίσης τα εντομοκτόνα και μυκητοκτόνα φυτοφάρμακα δεν εκπλύνονται , εφόσον το φύλλωμα δεν βρέχεται κατά το πότισμα, και η διάρκεια δράσης τους παρατείνεται. Τέλος σε διάφορα πειράματα, μυκητοκτόνα εδάφους που προστέθηκαν στο αρδευτικό νερό και απολυμαντικά εδάφους σε αέρια κατάσταση , που εφαρμόστηκαν στο δίκτυο αρδεύσεων , έδωσαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα και αρκετές ελπίδες για τη δυνατότητα εφαρμογής ορισμένων φυτοφαρμάκων μέσου των δικτύων αρδεύσεων

1.4.4.2 Μειονεκτήματα στάγδην άρδευσης

Η γρήγορη διάδοση της μεθόδου τα τελευταία χρόνια , αναμφίβολα οφείλεται στα σοβαρά αγρονομικά πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν. Όμως κατά την εφαρμογή της αντιμετωπίζονται σε μικρό ή μεγάλο βαθμό και διάφορα προβλήματα τα οποία αποτελούν μειονεκτήματα. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

Βουλώματα (εμφράξεις).

Κατά την λειτουργία των συγκροτημάτων με σταγόνες παρουσιάζονται συνήθως βουλώματα στους σταλακτήρες από οργανικά ή ανόργανα υλικά , που μεταφέρονται από το αρδευτικό νερό, από ιζήματα διαφόρων ενώσεων και από την ανάπτυξη διαφόρων μικροοργανισμών μέσα στο δίκτυο . (Φυσικές , χημικές , ή βιολογικές εμφράξεις).

Τα οργανικά υλικά συνήθως είναι μικρά κομμάτια διαφόρων φυτικών οργάνων (σπόροι , φύλλα , ξύλα κ.λπ.) , ή διάφοροι μικροοργανισμοί (σκουλήκια , έντομα , αυγά εντόμων κ.λ.π.).

Τα ανόργανα (άμμος , ιλύς , άργιλος) .

Τα μικρά αυτά τεμαχίδια μαζεύονται σιγά -σιγά στα τοιχώματα της οπής εκροής των σταλακτήρων , ή των μικροεκτοξευτήρων , και προκαλούν μείωση της διατομής με συνέπεια την μείωση της παροχής. Βουλώματα μπορεί να προκληθούν και από ιζήματα διαφόρων χημικών ενώσεων ιδίως Ca , Mg , Fe , Al, και P. Οι σχηματιζόμενοι συνήθως κρύσταλλοι των ενώσεων αυτών , περνούν το φίλτρο , προχωρούν στο υπόλοιπο δίκτυο και φθάνουν μέχρι τις οπές εκροής των σταλακτήρων τις οποίες σιγά σιγά βουλώνουν. Έπειτα η θερμοκρασία , που αναπτύσσεται μέσα στο σωληνωτό δίκτυο (μέχρι 70 ° C) και ιδίως προς τις άκρες του δικτύου, ευνοεί την κατακρήμνιση των αλάτων από την εξάτμιση του νερού που γίνεται από τους όχι αεροστεγείς συνδέσμους του δικτύου , ή από τους σταλακτήρες.

Τέλος βουλώματα μπορεί να προκληθούν και από την ανάπτυξη μέσα στο δίκτυο διαφόρων μικροοργανισμών (βακτήρια , μύκητες, κ.λπ.). Οι μικροοργανισμοί αυτοί μπορεί , είτε να βουλώνουν τις οπές των σταλακτήρων μαζεμένοι σε μορφή αποικιών , είτε να υποβοηθήσουν την συγκέντρωση και κατακρήμνιση διαφόρων ιζημάτων αλάτων.

Υψηλό κόστος αρχικής εγκατάστασης

Το κόστος εγκατάστασης του συστήματος της άρδευσης με σταγόνες εξαρτάται κυρίως από το είδος της καλλιέργειας, τη φύση του εδάφους, την επιτυχία και οικονομικότητα της μελέτης. Γι' αυτό χρειάζεται προσοχή στο σχεδιασμό του δικτύου και τους υπολογισμούς των διαμέτρων των σωλήνων. Επειδή πρόκειται για μόνιμο δίκτυο , με πολλά εξαρτήματα και αυτοματισμούς , το κόστος είναι σημαντικά υψηλό.

Κίνδυνος συγκέντρωσης αλάτων στο έδαφος

Στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης νερού που περιέχει άλατα, δημιουργείται πάντοτε μια αυξημένη συγκέντρωση απ' αυτά περιμετρικά , στα όρια μεταξύ της υγρής και ξερής φάσης του εδάφους. Και όταν μεν σημειώνονται ικανοποιητικές βροχοπτώσεις το πρόβλημα καταντά ασήμαντο, γιατί με τις βροχές απομακρύνονται τα άλατα στα βαθύτερα στρώματα, όταν όμως οι βροχοπτώσεις είναι ανεπαρκείς, τότε

πρέπει να γίνουν εκπλύσεις με επιπλέον αρδεύσεις. Σπουδαίο ρόλο στην αντιμετώπιση του προβλήματος παίζει η παράταση των αρδεύσεων μέχρι τις αρχές του χειμώνα.

Αδυναμία προστασίας από τους παγετούς

Δεν υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί το δίκτυο της άρδευσης για την προστασία των καλλιεργειών από τους παγετούς, όπως μπορεί να γίνει με τον καταιονισμό.

Εμφάνιση τροφοπενιών στα φυτά

Η αιτία της εμφάνισης τροφοπενιών αποτελεί το γεγονός της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος στο ίδιο πάντοτε τμήμα εδάφους, σ' εκείνο δηλαδή που συνεχώς υγραίνεται από τους σταλακτήρες. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο η λίπανση πρέπει να εφαρμόζεται μαζί με την άρδευση και να είναι πλήρης. Από την άλλη πλευρά η διατήρηση αυξημένης υγρασίας και καλού αερισμού του εδάφους κατά την άρδευση με σταγόνες ευνοεί τον πολλαπλασιασμό της μικροβιακής χλωρίδας, που επιταχύνει την αποσύνθεση της οργανικής ουσίας.

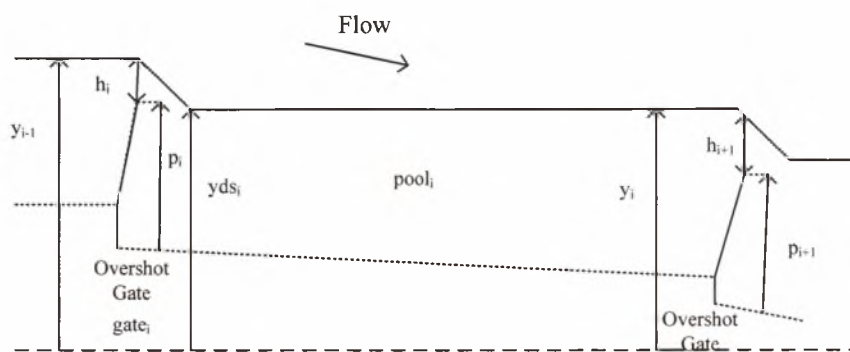
Εξοικείωση με τη μέθοδο.

Εκτός από το σχεδιασμό του δικτύου, που απαιτεί ειδικευμένο προσωπικό, η εγκατάσταση και η παρακολούθηση της λειτουργίας (έλεγχος εδαφικής υγρασίας, διαδικασία αλάτωσης, αυτοσχεδιασμός στον τρόπο και τη συχνότητα του ποτίσματος) απαιτούν εξοικείωση με το σύστημα και οι παραγωγοί χρειάζονται χρόνο να την αποκτήσουν.

(Για τα στοιχεία που παρουσιάζονται σ' αυτές τις ενότητες (1.1 - 1.4) βλέπε αναφορές ([B.73]-[B.82]))

1.5 Κανάλια άρδευσης

Σε παγκόσμια κλίμακα για την άρδευση χρησιμοποιείται το 70% του γλυκού νερού. Για τον λόγο αυτό η διανομή του γλυκού νερού επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη ενός εκτεταμένου αστικού δικτύου από δεξαμενές και ανοικτά κανάλια ύδατος. Στα μεγάλα δίκτυα καναλιών (1000 Km αρδευτικού δικτύου), η μεταφορά του νερού γίνεται με την δύναμη της βαρύτητας (όχι αντλίες), και η ροή του νερού μέσα στο δίκτυο ρυθμίζεται από τις πύλες όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Η επιφάνεια του νερού μεταξύ δύο πυλών ονομάζεται δεξαμενή. Πράγματι, τα ανοικτά κανάλια άρδευσης, σ' ένα αρδευτικό δίκτυο, μπορούν το καθένα από αυτά να θεωρηθεί ως μία σειρά δεξαμενών που συνδέονται με πύλες.



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση καναλιού άρδευσης

Η διοχέτευση του νερού στα αγροκτήματα και τα δευτερεύοντα κανάλια γίνεται από σημεία τα οποία βρίσκονται κατά μήκος του δικτύου των αρδευτικών καναλιών. Μέσα σε μία ενιαία δεξαμενή, τα σημεία αυτά βρίσκονται συνήθως στο τέλος, και προς την κάθοδο, του δικτύου. Ο ανεφοδιασμός των σημείων παροχής με νερό γίνεται συνήθως με την βοήθεια της δύναμης της βαρύτητας, αποκτώντας την απαιτούμενη ροή με την βοήθεια σταθμών ύδατος (δυναμική ενέργεια), επηρεάζοντας συνάμα τις απώλειες που σχετίζονται με την υπερβολική παροχή. Για των λόγω αυτό χρησιμοποιούνται οι ελεγκτές, οι οποίοι βρίσκουν τις θέσεις των πυλών με βάση τη στάθμη του ύδατος, οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών ύδατος. Η κατανόηση των σφαλμάτων της στάθμης του ύδατος, που εμφανίζονται κατά την διάδοση αυτού, είναι σημαντική, για την καλή γενική απόδοση του δικτύου και για τον λόγω ότι η ενίσχυση αυτού του λάθους μπορεί να οδηγήσει σε κορεσμό των ενεργοποιητών.

Τα αρδευτικά κανάλια χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν το νερό από ένα υδάτινο πόρο στους χρήστες. Αποτελούνται από μία σειρά δομών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να προτείνουν μία κατανομημένη δομή ελεγκτών. Πολλές κατανομημένες τεχνικές ελέγχου, έχουν μέχρι τώρα προταθεί στις διάφορες επιστημονικές εργασίες. Εφαρμόζουν συνήθως τον απομακρυσμένο έλεγχο στην κάθοδο, ο οποίος είναι φειδωλός από την άποψη της διαχείρισης των πηγών, αλλά έχει χαμηλή απόδοση σε σχέση με τους χρήστες ύδατος. Η άλλη κλασική πολιτική ελέγχου έχει να κάνει με τον τοπικό έλεγχο της ανάντης (ενάντια στην ροή) του καναλιού, ο οποίος είναι πολύ αποδοτικός όσον αφορά τους χρήστες, αλλά καταναλώνει πολύ ύδωρ. Αυτά τα κατανομημένα σχέδια ελεγκτών έχουν το πλεονέκτημα ότι συντονίζονται εύκολα και εφαρμόζονται εύκολα. Η δομή τους διευκολύνει επίσης στην διάγνωση και των εντοπισμό των σφαλμάτων, οδηγώντας στην εύκολη συντήρηση του δικτύου. Ωστόσο, καθένας από τους περιορισμούς, συνδέεται με το γεγονός ότι χρησιμοποιεί μόνο μία μεταβλητή ελέγχου για κάθε δεξαμενή, για να ελέγξει την έξοδο. Σε πρόσφατες μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί, οι ελεγκτές σχεδιάζονται με μία συγκεκριμένη μορφή, αλλά αυτές οι μέθοδοι είναι απαιτητικές υπολογιστικά και να είναι δύσκολο στο να εφαρμοστούν σε εκτεταμένα συστήματα όπως είναι τα κανάλια άρδευσης.

Ο μεγάλος κίνδυνος για τον έλεγχο των καναλιών άρδευσης, είναι στο να οριστεί μία απλή σχεδιαστική μέθοδος, η οποία θα συντονίζει τους ελεγκτές, επιτυγχάνοντας μία επιθυμητή εναλλαγή μεταξύ της διαχείρισης των υδάτινων πόρων και την απόδοση, με σεβασμό στους χρήστες ύδατος. Τοπικοί,

ανάντη και απομακρυσμένοι κατάντη, ελεγκτές μπορεί να εξεταστούν ως λύσεις, σε μία από τις δύο σχεδιαστικές απαιτήσεις.

Ο έλεγχος του σημείου καθόδου της στάθμης του νερού (σημείο όπου βρίσκονται οι περισσότερες παροχές) μπορεί να ρυθμιστεί ικανοποιητικά από την αντίστοιχη πύλη που βρίσκεται στην άνοδο του καναλιού. Για τον λόγω αυτό, η δράση του ελέγχου καθυστερεί πάντα, επειδή χρειάζεται κάποιο χρόνο στο νερό για να φτάσει από την ανάντη στην κατάντη της δεξαμενής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της απόδοσης που επιτυγχάνεται τελικά. Τελικά όμως, αυτές οι τεχνικές ελέγχου παράγουν την μέγιστη απόδοση όσον αφορά τις απώλειες ύδατος, σε σχέση με τα συστήματα στα οποία η κάτω στάθμη νερού ελέγχεται αποτελεσματικά από την κάτω πύλη του συστήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο έλεγχος της στάθμης ύδατος γίνεται διαμέσου της ροή του ύδατος στην δεξαμενή από την πηγή, αντί για τον έλεγχο της ροής προς την παροχή. Τέλος αν κάποιος θα πετύχαινε μία μεγαλύτερη απόδοση με κάποια τεχνική ελέγχου, αυτό θα ήταν πρακτικά μη εφαρμόσιμο, για λόγους υποδομής στην επικοινωνία των δικτύων και ιδιαίτερα στα μεγάλης κλίμακας αρδευτικά κανάλια, τα οποία βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές.

Τα υδραυλικά συστήματα ανοικτής επιφάνειας έχουν εξεταστεί με διάφορες προσεγγίσεις, στην μοντελοποίηση και τον έλεγχο αυτών. Τα συνηθισμένα μοντέλα, που αφορούν τον έλεγχο, είναι οι εξισώσεις Saint-Venant. Στην περιοχή αυτή δύο προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται συνήθως: η έμμεση προσέγγιση πεπερασμένων διαστάσεων (οι μερικές διαφορικές εξισώσεις προσεγγίζονται) και η άμεση προσέγγιση απείρων διαστάσεων (οι μέθοδοι και τα εργαλεία συσχετίζονται άμεσα με τις μερικές διαφορικές εξισώσεις).

1.6 Τεχνικές ελέγχου για τα κανάλια άρδευσης

Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης διάφορες μεθοδολογίες για το σχεδιασμό των ελεγκτών, στον έλεγχο των αυλακιών άρδευσης. Οι παλαιότερες και οι πιο δημοφιλέστερες απ' αυτές είναι, μερικές εμπειρικές μέθοδοι και οι κλασσικοί ελεγκτές τριών όρων PID. Λόγω όμως των χρονικών καθυστερήσεων που υπάρχουν στα υδραυλικά συστήματα, των μην γραμμικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων και στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποσυστημάτων, πολλές άλλες μέθοδοι έχουν εξεταστεί και είναι ακόμα υπό ανάπτυξη. Αυτές οι μέθοδοι παρατίθενται στις ακόλουθες παραγράφους [B.15], [B.24].

Ευρετικές μονομεταβλητές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί βασιζόμενες στην υδραυλική θεωρία και όχι στη θεωρία ελέγχου (e.g.: Zimbelman, CARDD). Όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία είναι μετά βίας λειτουργικοί και εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες περιοχές. Η LittleMan είναι μια εμπειρική μέθοδος βασισμένη σε έναν ελεγκτή τριών θέσεων [B.55]. Αυτές οι μέθοδοι πρέπει να εφαρμόζονται σε ένα πλήρες μοντέλο προσομοίωσης ή στο πραγματικό σύστημα, δεδομένου ότι κανένα μαθηματικό εργαλείο δεν μπορεί να το επιτρέψει αυτό, ούτε να αποδείξει τις αποδόσεις του. Αυτό είναι το κύριο μειονέκτημα των ευρετικών μεθόδων.

PID: Οι περισσότερες από τις μεθόδους ελέγχου των καναλιών άρδευσης, οι οποίες βασίζονται στην χρήση της θεωρίας ελέγχου, χρησιμοποιούν τον γραμμικό μονομεταβλητό ελεγκτή τριών όρων, PID. Τα παραδείγματα των σχετικών μεθόδων που αφορούν την εφαρμογή του PID ελεγκτή είναι: P: AMIL,

AVIS, AVIO; PI: ELFLO, BIVAL, Dynamic Regulation; PI: Sogreah; PID: UMA Engineering.). Μερικοί PID ελεγκτές ρυθμίζονται, χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο της διαδικασίας (μέσω τοποθέτησης πόλων σε μία SISO συνάρτηση μεταφοράς), ενώ μερικοί άλλοι ρυθμίζονται απευθείας στην πραγματική διαδικασία ή πάνω σε ένα πλήρες μη γραμμικό μοντέλο (μέθοδος the Ziegler-Nichols)

Προβλέψεις Smith: Αν και πολύ αποδοτικοί στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ελεγκτές PID δεν λαμβάνουν απαραίτητα υπόψη τις χαρακτηριστικές χρονικές καθυστερήσεις των καναλιών. Το 1971, ο Shand [B.64] ερευνήσε τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα Smith Predictor προκειμένου να υπερνικηθεί αυτό το πρόβλημα, κατά τη μελέτη της αυτοματοποίησης ενός καναλιού στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Ανάπτυξε ένα αναλογικό μοντέλο Dead- Time αυξάνοντας τις τεχνολογικές δυσκολίες, αυτή τη φορά. Επομένως, αν και λιγότερο αποδοτική, η μέθοδος ELFLO επιλέχτηκε τελικά. Πρόσφατα, ο συνδυασμός ενός ελεγκτή PI με ένα Smith Predictor αναπτύχθηκε περαιτέρω [B.31], [B.58]. Αυτός ο ελεγκτής ονομάζεται PIR. Οι σύγχρονες ψηφιακές τεχνολογίες λύνουν τα προβλήματα που παρουσιάζονται στον νόμο ελέγχου του Shand.

Τοποθέτηση Πόλων: Άλλοι γραμμικοί ελεγκτές έχουν χρησιμοποιηθεί στα συστήματα ποταμών με μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις από CACG, [B.52]. Χρησιμοποιούνται συναρτήσεις μεταφοράς μεγάλης τάξης, και ρυθμίζονται με την τεχνική της τοποθέτησης πόλων.

Predictive έλεγχος: Η μέθοδος του predictive ελέγχου, είναι συνήθως μία μονομεταβλητή μέθοδο βελτιστοποίησης, η οποία εφαρμόζεται στα κανάλια άρδευσης από πολλούς συγγραφείς [B.59], [B.54], [B.56], [B.51], [B.1]. Δεν βασίζεται στην σχεδιαστική απαίτηση του συστήματος κλειστού βρόχου, αλλά στην ελαχιστοποίηση ενός κριτηρίου J , αντισταθμίζοντας τη μεταβλητή ελέγχου και το λάθος μεταξύ της ελεγχόμενης μεταβλητής και επιθυμητής τιμής. Η μέθοδος του προβλεπτικού ελέγχου χρησιμοποιείται συνήθως σε συναρτήσεις μεταφοράς ή σε μοντέλα στο χώρο κατάστασης [B.49]. Μπορεί επίσης να ενσωματώσει ένα σύστημα ανοικτού βρόχου με ένα σύστημα κλειστού βρόχου.

Ασαφής έλεγχος: Είναι μέθοδοι βασισμένες στον ασαφή έλεγχο [B.21], [B.70], [B.66], [B.65], τα έμπειρα συστήματα, ή τα νευρικά δίκτυα [B.60], [B.68]. Οι γεννητικοί αλγόριθμοι έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε τέτοια συστήματα. Τουλάχιστον 3 επιτυχείς εφαρμογές ασαφούς ελέγχου μπορούν να αναφερθούν, στα SISO συστήματα (T2, CPBS, και κανάλια Roosevelt).

Αντιστροφή μοντέλου: Διαφορετικές μέθοδοι αντιστροφής μοντέλου (επίσης αποκαλούμενες Backward Computation) περιγράφονται στη βιβλιογραφία και οδηγούν σε ελεγκτές ανοικτού βρόχου [B.33], [B.50], [B.26], [B.43], [B.20], και σπανιότερα σε ελεγκτές κλειστών βρόγχων [B.44]. Είναι βασισμένοι σε ένα μη γραμμικό μοντέλο πεπερασμένου βαθμού Αντιστρέφοντας αυτό το μοντέλο συμπεριλαμβάνοντας και την δυναμική διάχυση μπορεί να οδηγήσει σε μία συμπεριφορά του συστήματος με ταλαντώσεις. Προκειμένου να αποτραπεί αυτό, εισάγονται στο σύστημα συντελεστές απόσβεσης. Αυτοί πρέπει να ρυθμιστούν μέσω δοκιμών και διαδικασίες λάθους δεδομένου ότι κανένα μαθηματικό εργαλείο δεν μπορεί να επιτρέψει αυτό.

Μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν αναπτυχθεί επίσης. Αυτές οι μέθοδοι είναι, στην ουσία, πολυμεταβλητές. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί: γραμμική βελτιστοποίηση [B.57], μη γραμμική

βελτιστοποίηση [B.67], [B.38], [B.40] και LQR [B.29], [B.16], [B.37], [B.35], [B.34], [B.53], [B.45], [B.46]. Οι κλασικές μη γραμμικές μέθοδοι βελτιστοποίησης εφαρμόζονται αποκλειστικά σε συστήματα ανοικτού βρόχου και είναι ευαίσθητες στο θόρυβο και τις διαταραχές. Προκειμένου να εφαρμοστού σε μία διαδικασία κλειστού βρόχου, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης πρέπει να υποβληθούν σε μία περιοδική επεξεργασία (παραδείγματος χάριν ένα βήμα την φορά). Αυτό περιπλέκει τη μέθοδο και τα όρια του ελέγχου εφαρμόζοντα σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, ο προσδιορισμός των πραγματικών αρχικών συνθηκών, που απαιτούνται για τη βελτιστοποίηση, δεν είναι εύκολος. Αφ' ετέρου, οι μέθοδοι LQR, βασίζονται σε μία απεικόνιση του μοντέλου στο χώρο κατάστασης, ενσωματώνοντας στην ουσία ένα σύστημα ανοικτού βρόχο και ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Πρόσφατα έχει δοκιμαστεί στα κανάλια άρδευσης και η ελαχιστοποίηση της νόρμας H_2 . Αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την επιλογή ενός πολυμεταβλητού ελεγκτή, και ειδικότερα την σχεδίαση ενός decentralized ελεγκτή [B.63], [B.61]. Όταν η τάξη του συστήματος είναι πάρα πολύ μεγάλη ή χρειάζεται να σχεδιαστεί ένας decentralized ελεγκτής, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια προσέγγιση decomposition-coordination [B.39], [B.32].

Εύρωστος έλεγχος: δεδομένου ότι μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων συστημάτων είναι αβέβαιες παράμετροι και παρουσιάζονται σφάλματα που οφείλονται στην μη γραμμικότητα, οι εύρωστοι ελεγκτές παρουσιάζουν ενδιαφέρον και έχουν εξεταστεί από πολλούς συγγραφείς [B.61], [B.41].

Προσαρμοστικός έλεγχος: Τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του συστήματος μπορούν να ληφθούν υπόψη με τη χρησιμοποίηση των προσαρμοστικών γραμμικών ελεγκτών [B.23], [B.58].

Μη γραμμικός έλεγχος: Μια άμεση μη γραμμική προσέγγιση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί [B.27]. Η μέθοδος αυτή είναι πιθανώς η δυσκολότερη, από θεωρητικής άποψης. Αλλά αν η μη γραμμικοί ελεγκτές έχουν δυσκολίες υλοποίησης και υπολογισμού, μπορούν να αποδειχθούν πολύ ισχυροί.

2.0 Εύρεση Μοντέλου Καναλιού Άρδευσης

Η δυναμική ροή του νερού μπορεί να προσδιοριστεί από τις ακόλουθες δύο μερικές μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, γνωστές ως Saint - Venant εξισώσεις:

$$\begin{aligned}\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/s)}{\partial x} + gs\left(\frac{\partial h}{\partial x} - I + J\right) &= k_q q \frac{Q}{s}\end{aligned}\quad (1.1)$$

όπου:

$$J = \frac{Q|Q|}{Di^2}, Di = Ks\left(\frac{s}{p}\right)^{2/3}\quad (1.2)$$

και όπου s υγρό τμήμα, Q μεταβολή της ροής του νερού, J τριβή, h σχετική στάθμη ύδατος, I κλίση του καναλιού, q διήθηση, K συντελεστής τριβής και $k_q = 0$ εάν $q > 0$ και $k_q = 1$ εάν $q < 0$.

Για την περίπτωση ενός ορθογωνίου καναλιού, προκύπτει:

$$s = Bh, p = B + 2h\quad (1.3)$$

Όπου p δηλώνει το πλάτος του καναλιού.

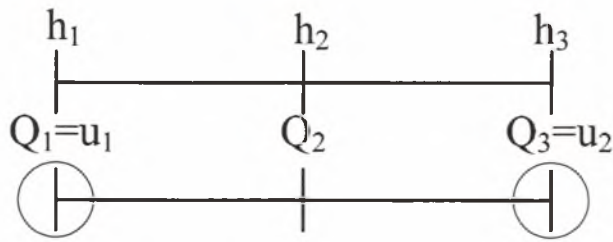
Για ένα κανάλι με μικρή κλίση (μικρότερη από την κρίσιμη ροή του νερού), όπως αυτό που εξετάζεται σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιούνται δύο οριακές συνθήκες, της ανόδου και της καθόδου. Υπάρχουν τέσσερις δυνατότητες, και δεδομένου ότι οι οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές ελέγχου, επιλέγονται ως οριακές συνθήκες το ποσοστό ροής της ανόδου και της καθόδου:

$$\begin{aligned}Q(x = 0, t) &= Q_0(t) = u_1(t) \\ Q(x = L, t) &= Q_n(t) = u_2(t)\end{aligned}\quad (1.4)$$

Τελικά οι αρχικές συνθήκες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}h(x, 0) &= h_1(x) \\ Q(x, 0) &= Q_1(x) \forall x \in [0, L]\end{aligned}\quad (1.5)$$

όπου L είναι το μήκος του καναλιού.



Σχήμα 2: Παράθεση σημείων και οριακών συνθηκών

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΙΩΜΕΝΟΥ ΒΑΘΜΟΥ

Ένα μοντέλο μειωμένου βαθμού έχει την ακόλουθη μορφή [[6]]:

$$\begin{aligned}\dot{h}_1 &= \frac{1}{BL}[-4Q_2 + 3u_1 + u_2] + \frac{q}{B} \\ \dot{h}_2 &= \frac{1}{BL}[u_1 - u_2] + \frac{q}{B} \\ \dot{h}_3 &= \frac{1}{BL}[4Q_2 - u_1 - 3u_2] + \frac{q}{B} \\ \dot{Q}_2 &= f(Q_2, h_1, h_2, h_3, u_1, u_2, q)\end{aligned}\tag{1.6}$$

όπου

$$f(Q_2, h_1, h_2, h_3, u_1, u_2, q) = gBh_2 \left(I + \frac{h_1 - h_3}{L} \right) + \left(\frac{2(u_1 - u_2)}{BL} + \frac{k_q q}{B} \right) \frac{Q_2}{h_2} + \left(\frac{h_3 - h_1}{BLh_2^2} - \frac{g}{K^2 Bh_2 \left(\frac{Bh_2}{B + 2h_2} \right)^{4/3}} \right) Q_2^2\tag{1.7}$$

2.2 Γραμμικοποίηση μη γραμμικού μοντέλου

2.2.1 Θεωρητική ανάλυση

2.2.1.1 Θεωρητική ανάλυση συστήματος χωρίς είσοδο



εωρούμε ένα σύστημα της μορφής [Α.6]:

$$\dot{x} = f(x) \quad (1.8)$$

όπου:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1.9)$$

Έστω

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (1.10)$$

όπου

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Το γραμμικό σύστημα

$$\dot{x} = Ax \quad (1.12)$$

Αποτελεί την γραμμικοποίηση του μη γραμμικού συστήματος (1.8) γύρω από το σημείο ισορροπίας $x = 0$. Το σύστημα (1.12) προκύπτει από (1.8) αναπτύσσοντας την f σε σειρά Taylor γύρω από το $x = 0$ ως εξής:

$$f(x) = f(0) + \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=0} x + \text{όροι μεγαλύτερης τάξης}$$

$$f(x) = \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=0} x + \text{όροι μεγαλύτερης τάξης}$$

Και αγνοώντας τους όρους τάξης μεγαλύτερης της πρώτης. Επομένως, το γραμμικό σύστημα (1.12) αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση του μη γραμμικού συστήματος (1.8), αρκεί η τροχιά του συστήματος να παραμένει ικανοποιητικά κοντά στο σημείο ισορροπίας $x = 0$. Το εύρος της περιοχής στην οποία θεωρούμε αυτήν την προσέγγιση ικανοποιητική εξαρτάται από την μορφή της συνάρτησης f .

2.2.1.2

Θεωρητική ανάλυση συστήματος με είσοδο

Εστω ένα μη γραμμικό σύστημα με είσοδο περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1.13)$$

όπου:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1.14)$$

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T \quad (1.15)$$

όπου $u \in \mathbb{R}^n$ είναι το διάνυσμα εισόδων του συστήματος, $f(0,0) = 0$, ενώ η συνάρτηση f έχει μερικές παραγώγους έως και πρώτης τάξης, τόσο ως προς x όσο και ως προς u . Έστω τώρα ένα σημείο (x_0, u_0) τέτοιο ώστε $f(x_0, u_0) = 0$. Κάθε σημείο (x_0, u_0) που ικανοποιεί αυτή τη συνθήκη καλείται σημείο λειτουργίας του συστήματος. Έστω:

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x=x_0, u=u_0)}, B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{(x=x_0, u=u_0)} \quad (1.16)$$

όπου ο πίνακας $\frac{\partial f}{\partial x}$ ορίζεται όπως στην (1.11) και

$$\frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Το γραμμικό σύστημα

$$\delta \dot{x} = A\delta x + B\delta u \quad (1.18)$$

όπου:

$$\delta x(t) = x(t) - x_0, \delta u(t) = u(t) - u_0 \quad (1.19)$$

αποτελεί την γραμμικοποίηση του μη γραμμικού συστήματος (1.13) γύρω από το σημείο λειτουργίας (x_0, u_0) .

Το γραμμικό σύστημα (1.18) χρησιμοποιείται στην πράξη για τη σχεδίαση ελεγκτή για το μη γραμμικό σύστημα (1.13). Συγκεκριμένα αν $\delta u(t)$ νόμος ελέγχου που επιτυγχάνει επιθυμητή συμπεριφορά για το γραμμικό σύστημα (1.18), τότε η εφαρμογή του νόμου ελέγχου $u(t) = \delta u(t) + u_0$ στο μη γραμμικό σύστημα (1.13) αναμένεται να πετύχει επιθυμητή συμπεριφορά του μη γραμμικού συστήματος, υπό την προϋπόθεση ότι οι τροχιές $(x(t), u(t))$ του συστήματος παραμένουν αρκετά κοντά στο σημείο λειτουργίας (x_0, u_0) . Το εύρος της περιοχής λειτουργίας όπου ισχύει η προαναφερόμενη προσέγγιση δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί και εξαρτάται από την μορφή της συνάρτησης f .

Παρόλα αυτά, η παραπάνω τεχνική σχεδίασης ελεγκτών για μη γραμμικά συστήματα χρησιμοποιείται συχνά στην πράξη. Αυτό συμβαίνει βασικά για δύο λόγους:

a) Διευκολύνει σημαντικά την σχεδίαση του ελεγκτή, καθώς το πρόβλημα ανάγεται στη σχεδίαση ελεγκτή για γραμμικό σύστημα, όπου υπάρχουν πολλές διαθέσιμες τεχνικές.

b) Σε πολλές περιπτώσεις το μη γραμμικό μοντέλο δεν είναι διαθέσιμο, ενώ το αντίστοιχο γραμμικό προσδιορίζεται με εφαρμογή διαδικασίας ταυτοποίησης γύρω από το σημείο λειτουργίας.

2.2.2 Γραμμικοποίηση μη γραμμικού μοντέλου του καναλιού άρδευσης.

Στην παρούσα παράγραφο θα μελετηθεί η γραμμικοποίηση του μη γραμμικού μοντέλου του καναλιού άρδευσης και θα εξαχθεί το γραμμικό μοντέλο άρδευσης. Γραμμικοποιώντας την σχέση (1.6) (με βάση την θεωρία της παραγράφου 2.2.1.2) και θέτοντας όπου $h_1 = \Delta h_1 + h_{10}$, $h_2 = \Delta h_2 + h_{20}$, $h_3 = \Delta h_3 + h_{30}$, $Q_2 = \Delta Q_2 + Q_{20}$, $u_1 = \Delta u_1 + u_{10}$, $u_2 = \Delta u_2 + u_{20}$ και $q = \Delta q + q_0$ προκύπτουν οι ακόλουθες γραμμικές σχέσεις:

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{BL}[-4Q_2 + 3u_1 + u_2] + \frac{q}{B} \quad (1.20)$$

$$\dot{h}_2 = \frac{1}{BL}[u_1 - u_2] + \frac{q}{B} \quad (1.21)$$

$$\dot{h}_3 = \frac{1}{BL}[4Q_2 - u_1 - 3u_2] + \frac{q}{B} \quad (1.22)$$

$$\dot{Q}_2 = A_1 h_1 + A_2 h_2 + A_3 h_3 + A_4 u_1 + A_5 u_2 + A_6 q \quad (1.23)$$

όπου:

$$A_1 = \frac{Bgh_{20}}{L} - \frac{Q_{20}^2}{Bh_{20}^2 L} \quad (1.24)$$

$$A_2 = \frac{3B^3gh_{20}^2\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{1/3}K^2(h_{10}-h_{30}+IL)+6gh_{20}LQ_{20}^2+BQ_{20}((6h_{10}\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{1/3}K^2-3B^2h_{20}^3\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{1/3}K^2L-6\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{1/3}h_{30}K^2+7gL)Q_{20}-3h_{20}\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{1/3}K^2(k_qLq_0+2u_{10}+2u_{20}))}{3B^2h_{20}^3\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{1/3}K^2L} \quad (1.25)$$

$$A_3 = \frac{-B^2gh_{20}^3+Q_{20}^3}{Bh_{20}^2L} \quad (1.26)$$

$$A_4 = \frac{2Q_{20}}{Bh_{20}L} \quad (1.27)$$

$$A_5 = -\frac{2Q_{20}}{Bh_{20}L} \quad (1.28)$$

$$A_6 = \frac{2\left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{4/3}}+\frac{h_{30}-h_{10}}{L}\right]Q_{20}+\frac{h_{20}(k_qLq_0+2u_{10}-2u_{20})}{L}}{Bh_{20}^2} \quad (1.29)$$

$$A_7 = \frac{k_qQ_{20}}{Bh_{20}} \quad (1.30)$$

και όπου:

$$h_{10} = 5 \quad (1.31)$$

$$h_{20} = 5 \quad (1.32)$$

$$h_{30} = 5 \quad (1.33)$$

$$q = 0.001 \quad (1.34)$$

$$u_{10} = \frac{B^4gh_{20}^4K^2(h_{10}-h_{30}+IL)-4Bgh_{20}\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{2/3}LQ_{20}^2-4gh_{20}^2\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{2/3}LQ_{20}^2+2B^2h_{20}^2K^2(k_q-2)Q_{20}}{B^2\left[h_{20}K^2(h_{10}-h_{30}+2h_{20}(k_q-2))+g\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}\right)^{2/3}L\right]Q_{20}^2-2B^2h_{20}^2K^2(k_q-2)Q_{20}} \quad (1.35)$$

$$u_{20} = \frac{-B^4 g h_{20}^4 K^2 (h_{10} - h_{30} + IL) + 4Bgh_{20} \left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} LQ_{20}^2 + 4gh_{20}^2 \left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} LQ_{20}^2 + 2B^2 h_{20}^2 K^2 (k_q - 2) Q_{20}}{B^2 \left(h_{20} K^2 (h_{10} - h_{30} + 2h_{20} (k_q - 2)) + g \left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L \right) Q_{20}^2 + 2B^2 h_{20}^2 K^2 (k_q - 2) Q_{20}} \quad (1.36)$$

$$Q_{20} = \frac{-B^4 g h_{20}^4 K^2 (h_{10} - h_{30} + IL) + 4Bgh_{20} \left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} LQ_{20}^2 + 4gh_{20}^2 \left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} LQ_{20}^2 + 2B^2 h_{20}^2 K^2 (k_q - 2) Q_{20}}{B^2 \left(h_{20} K^2 (h_{10} - h_{30}) + g \left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L \right) Q_{20}^2 + B^2 h_{20}^2 K^2 (k_q - 2) L Q_{20}} \quad (1.37)$$

2.3 Μοντέλο καναλιού Άρδευσης στο χώρο κατάστασης

Το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος αποτελείται από τη στάθμη του νερού του καναλιού h_1 στο σημείο 1, τη στάθμη του νερού του καναλιού h_2 στο σημείο 2, τη στάθμη του νερού του καναλιού h_3 στο σημείο 3 και την μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού Q_2 . Το διάνυσμα εισόδου αποτελείται από την μεταβολή της ροής στην είσοδο του καναλιού u_1 και από την μεταβολή της ροής στην έξοδο του καναλιού u_2 (βλέπε Σχήμα 2). Τέλος το διάνυσμα των διαταραχών αποτελείται από την μεταβολή της διήθησης του νερού. Έτσι το μοντέλο του συστήματος στο χώρο κατάστασης, το διάνυσμα κατάστασης, το διάνυσμα ελέγχου και το διάνυσμα των διαταραχών περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Dz(t) \\ y(t) &= C\Delta x(t) \end{aligned} \quad (1.38)$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \\ h_2(t) \\ Q_2(t) \end{bmatrix} \quad (1.39)$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

$$z(t) = q(t) \quad (1.41)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

όπου:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (1.43)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix} \quad (1.44)$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \\ d_{41} \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

και όπου:

$$a_{14} = -\frac{4}{BL} \quad (1.46)$$

$$a_{34} = \frac{4}{BL} \quad (1.47)$$

$$a_{41} = A_1 \quad (1.48)$$

$$a_{42} = A_2 \quad (1.49)$$

$$a_{43} = A_3 \quad (1.50)$$

$$a_{44} = A_6 \quad (1.51)$$

$$b_{11} = \frac{3}{BL} \quad (1.52)$$

$$b_{12} = \frac{1}{BL} \quad (1.53)$$

$$b_{21} = \frac{1}{BL} \quad (1.54)$$

$$b_{22} = -\frac{1}{BL} \quad (1.55)$$

$$b_{31} = -\frac{1}{BL} \quad (1.56)$$

$$b_{41} = \frac{4}{BL} \tag{1.57}$$

$$b_{42} = -\frac{4}{BL} \tag{1.58}$$

$$d_{11} = \frac{1}{B} \tag{1.59}$$

$$d_{21} = \frac{1}{B} \tag{1.60}$$

$$d_{31} = \frac{1}{B} \tag{1.61}$$

$$d_{41} = \frac{2k_q}{B} \tag{1.62}$$

Σύμβολο	Επεξήγηση	Τιμή
I	Κλίση του καναλιού	0.1%
B	Πλάτος του καναλιού	$1m - 4m$
L	Το μήκος του καναλιού	$1000m - 10000m$
k_q		1
K	Συντελεστής τριβής	25
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	$9.81(m / sec^2)$

Πίνακας 1: Περιγραφή των μεταβλητών και παραμέτρων του συστήματος

2.4 Απόκριση του γραμμικού συστήματος ανοιχτού βρόχου για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων

Το μήκος του καναλιού L και το πλάτος (B) του θεωρούνται ως αβέβαιοι παράμετροι του συστήματος. Έστω $q_1 = L \in Q$ και $q_2 = B \in Q$, όπου Q είναι το πεδίο των αβεβαιοτήτων και όπου $q_1 \in (q_1^-, q_1^+)$ και $q_2 \in (q_2^-, q_2^+)$. Μετά από αντικατάσταση των παραμέτρων του συστήματος (Πίνακας 1), η περιγραφή του γραμμικού συστήματος στο χώρο κατάστασης είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(q_1, q_2)x(t) + B(q_1, q_2)u(t) + D(q_1, q_2)z(t) \\ y(t) &= C\Delta x(t) \end{aligned} \tag{1.63}$$

όπου:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{34} \\ \tilde{a}_{41} & \tilde{a}_{42} & \tilde{a}_{43} & \tilde{a}_{44} \end{bmatrix} \quad (1.64)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix} \quad (1.65)$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \\ \tilde{d}_{41} \end{bmatrix} \quad (1.66)$$

όπου:

$$\tilde{a}_{41} = \frac{49.05B}{L} - \frac{4}{BL} \quad (1.67)$$

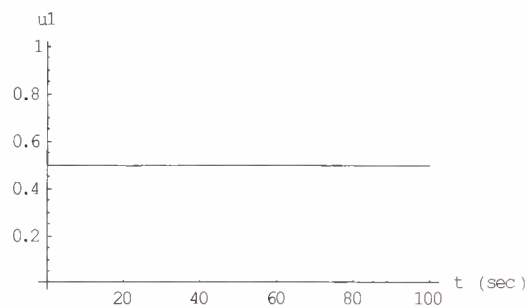
$$\tilde{a}_{42} = \frac{0.01962B^4 \sqrt[3]{\frac{B}{B+10}} + 0.1962B^3 \sqrt[3]{\frac{B}{B+10}} + 0.0097101B^2 + 0.0979101B + 5.8095 \cdot 10^{-16}}{B^2 \sqrt[3]{\frac{B}{B+10}} (B+10)} \quad (1.68)$$

$$\tilde{a}_{43} = \frac{100 - 1226.25B^2}{25BL} \quad (1.69)$$

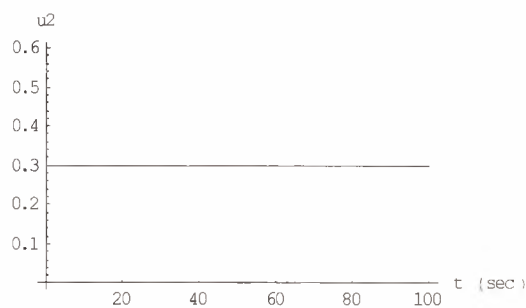
$$\tilde{a}_{44} = \frac{-0.004905B^4 \sqrt[3]{\frac{B}{B+10}} - 0.004905B^3 \sqrt[3]{\frac{B}{B+10}} - 0.04905B^2 - 0.00367163B - 0.367163}{B^2 \sqrt[3]{\frac{B}{B+10}} (B+10)} \quad (1.70)$$

$$\tilde{d}_{14} = \frac{2}{B} \quad (1.71)$$

Το σύστημα ανοιχτού βρόχου διεγείρεται με εντολή εισόδου $u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) & u_2(t) \end{bmatrix}^T$, όπου $u_1(t)$ και $u_2(t)$ είναι συναρτήσεις οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:

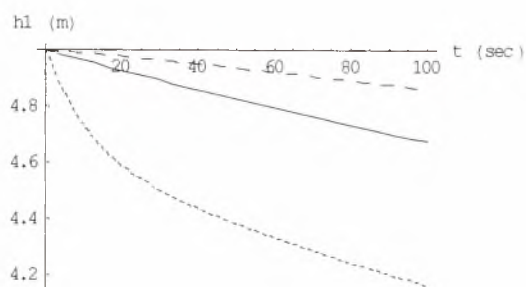


Σχήμα 3: Μεταβλητή ελέγχου 1

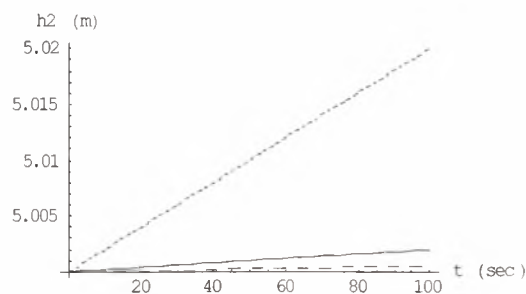


Σχήμα 4: Μεταβλητή ελέγχου 2

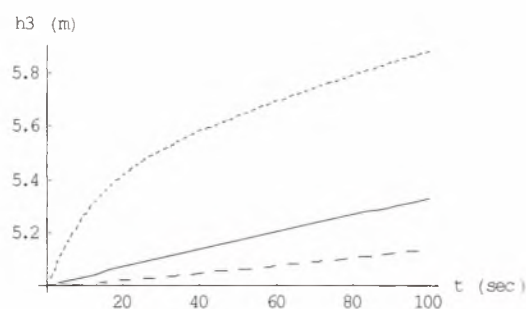
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του γραμμικού συστήματος ανοικτού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η στικτή γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



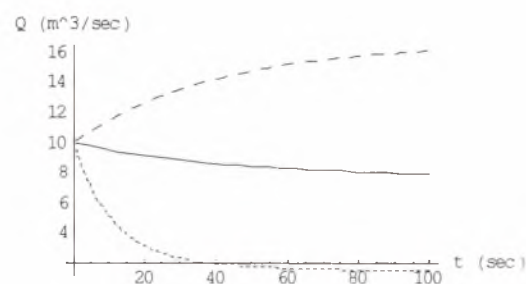
Σχήμα 5: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 6: Στάθμη ύδατος στο μέσο του καναλιού



Σχήμα 7: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού



Σχήμα 8: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

2.5 Απόκριση του μη γραμμικού συστήματος ανοιχτού βρόχου για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων

Το μήκος του καναλιού L και το πλάτος (B) του θεωρούνται ως αβέβαιοι παράμετροι του συστήματος. Έστω $q_1 = L \in Q$ και $q_2 = B \in Q$, όπου Q είναι το πεδίο των αβεβαιοτήτων

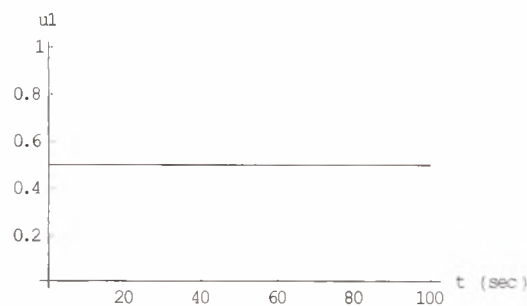
και όπου $q_1 \in (q_1^-, q_1^+)$ και $q_2 \in (q_2^-, q_2^+)$. Μετά από αντικατάσταση των παραμέτρων του συστήματος στις εξισώσεις μη γραμμικής περιγραφής του η συστήματος και θεωρώντας μηδενική διήθηση (Πίνακας 1), η περιγραφή του μη γραμμικού συστήματος είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned}\dot{h}_1 &= \frac{1}{BL}[-4Q_2 + 3u_1 + u_2] \\ \dot{h}_2 &= \frac{1}{BL}[u_1 - u_2] \\ \dot{h}_3 &= \frac{1}{BL}[4Q_2 - u_1 - 3u_2] \\ \dot{Q}_2 &= f(Q_2, h_1, h_2, h_3, u_1, u_2)\end{aligned}\quad (1.72)$$

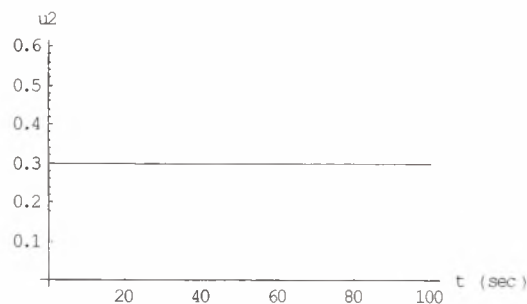
Όπου:

$$f(Q_2, h_1, h_2, h_3, u_1, u_2) = \frac{\frac{9.81B^2h_2^3(0.001L + h_1 - h_3)}{L} + \frac{(2u_1 - 2u_2)h_2Q_2}{L} + \left[-\frac{0.015696h_2}{\left(\frac{Bh_2}{2 + Bh_2} \right)} \right] Q_2^2}{Bh_2^2}\quad (1.73)$$

Το σύστημα ανοικτού βρόχου διεγείρεται με εντολή εισόδου $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t)]^T$, όπου $u_1(t)$ και $u_2(t)$ είναι συναρτήσεις οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



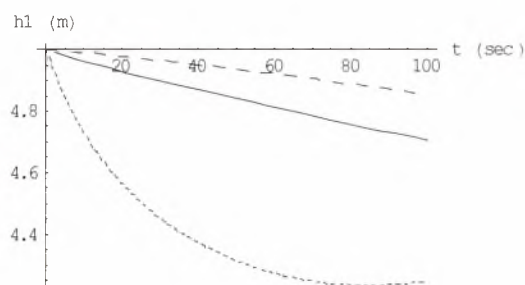
Σχήμα 9: Μεταβλητή ελέγχου 1



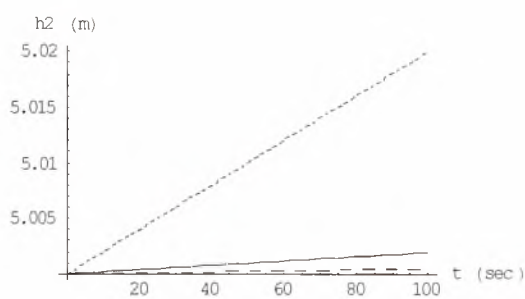
Σχήμα 10: Μεταβλητή ελέγχου 2

Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του μη γραμμικού συστήματος ανοικτού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η στικτή γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων

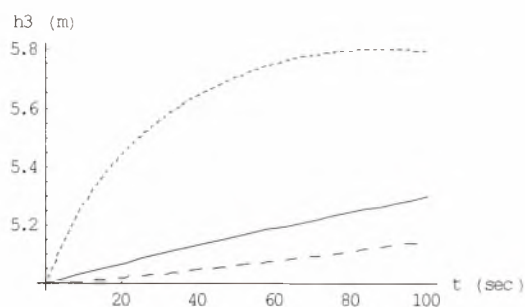
$\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



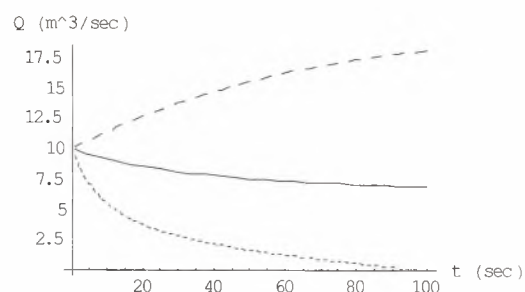
Σχήμα 11: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 12: Στάθμη ύδατος στο μέσο του καναλιού



Σχήμα 13: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού

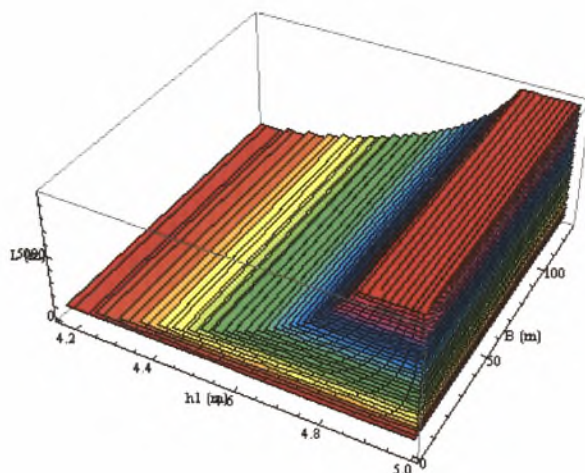


Σχήμα 14: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

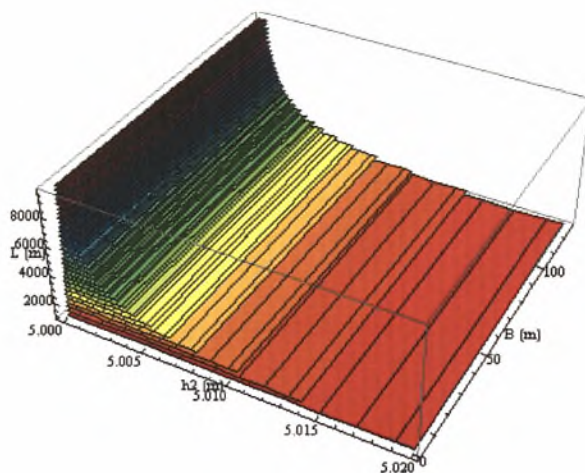
2.6 Απόκριση γραμμικού και μη γραμμικού συστήματος ανοιχτού βρόχου για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η επίδραση που έχουν οι αβεβαιότητες στο διάνυσμα κατάστασης του συστήματος. Ποιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται διαγράμματα τριών διαστάσεων για το γραμμικό και το μη γραμμικό μοντέλο του συστήματος ανοιχτού βρόχου. Ο ένας άξονας περιέχει την μεταβολή της αβεβαιότητας q_1 , ο άλλος την μεταβολή της αβεβαιότητας q_2 και ο άλλος την έξοδο των μεταβλητών κατάστασης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα.

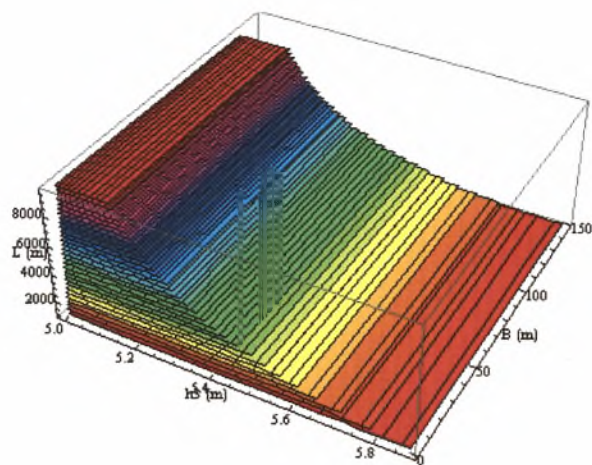
2.6.1 Γραμμικό σύστημα ανοιχτού βρόχου.



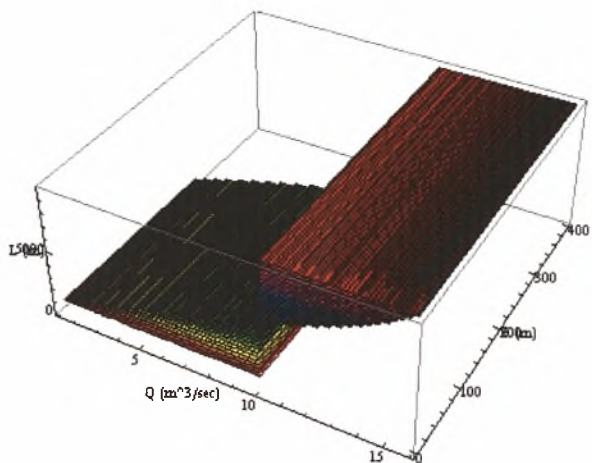
Σχήμα 15: Στάθμη στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 16: Στάθμη στην μέση του καναλιού



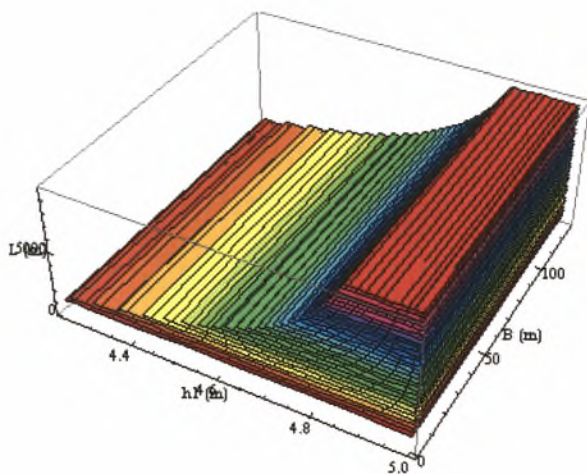
Σχήμα 17: Στάθμη στην έξοδο του καναλιού



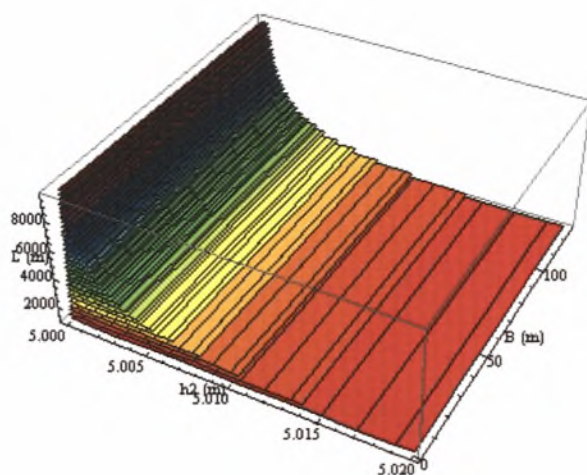
Σχήμα 18: Ροή εξόδου

2.6.2

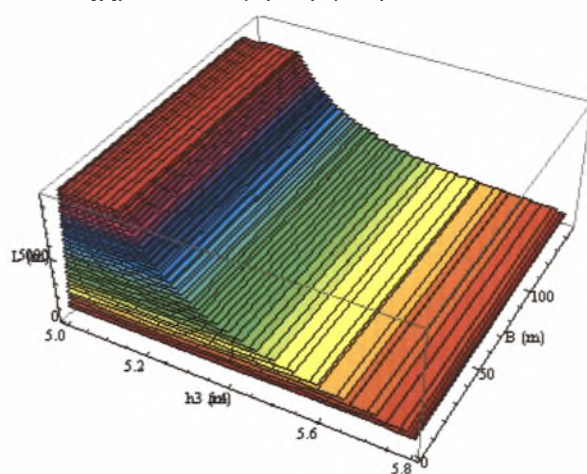
Μη γραμμικό σύστημα ανοιχτού βρόχους.



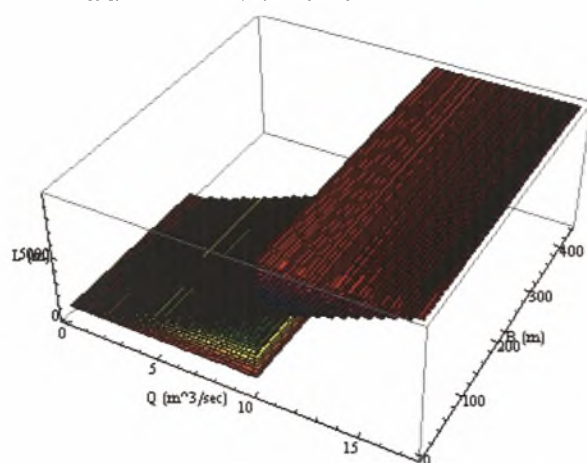
Σχήμα 19: Στάθμη στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 20: Στάθμη στην μέση του καναλιού



Σχήμα 21: Στάθμη στην έξοδο του καναλιού



Σχήμα 22: Ροή εξόδου

Από τις αποκρίσεις του διανύσματος κατάστασης για το γραμμικό και το μη γραμμικό μοντέλο του καναλιού άρδευσης γίνεται κατανοητό πως το σύστημα είναι ασταθές άρα είναι απαραίτητη η σχεδίαση ελεγκτών που θα ευσταθιοποιούν το σύστημα. Επίσης η προσέγγιση του γραμμικού από το μη γραμμικό

μοντέλο είναι ικανοποιητική καθώς παρατηρείται ότι οι αποκρίσεις των δύο συστημάτων (γραμμικού και μη γραμμικού) ανοικτού βρόχου ταυτίζονται.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] Glidas Basancon, Jean-Francois Dulhotse and Didier Georges “Nonlinear Observer Design For water Level Control in Irrigation Canals”, proceedings of the 40th IEEE Conference, Orlando, Florida USA, December 2001
- [2] Bornard G. and Hammouri H. “A high gain observer for a class of uniformly observable system”. IEEE CDC Conf. Brighton England 1991
- [3] Colley R.L and Moin S.A “Finite element solution of Saint Venant equation”, Journal of hydraulical Engineering. Division ASCE, Vol 102, No HY6, pp. 759-775.1976
- [4] Dulhoste J-F, Besancon G and Georges D., “Non-linear control of a water flow dynamics by Input-Output Linearization based on a collocation Method mode”, ECC2001, Porto, Portugal, September 2001.
- [5] Fletcher C.A.J “Computation Galerkin Methods”. Springer Series in computational Physics. Springer-Verlag 1984
- [6] Georges D. Dullhost J-F, and Besancon G. “Modeling and control of water flow dynamics via a collocation model”. MTNS2000.Perpignan, France 2000
- [7] Isidor A.. Nonlinear Control Systems. Springer –Verlag Berlin 3rd edition. 1995
- [8] Strekoff T. “Numerical Solution of Saint Venant equation” Journal of hydraulical Engineering. Division ASCE Vol. 96, NO HY1, pp 223-252.1970
- [9] Villadsen J.V and Micheisen M.L. “Solution of differential equation models by polynomial approximation”. Prentice Hall. Englewood Cliffs, N,J 1978

3.0 Εύρωστη Ακολουθήση Βηματικής Εντολής και Εξασθένιση Διαταραχών

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί το πρόβλημα σχεδιασμού μιας μονάδας αντιστάθμισης με την προσθήκη της οποίας επιτυγχάνεται μια προσεγγιστική παρακολούθηση ενός σήματος αναφοράς στην είσοδο καθώς και μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση ισορροπίας. Τα σήματα αναφοράς μπορεί να είναι συναρτήσεις βήματος, συναρτήσεις κλίσης(ράμπες) καθώς και άλλα είδη σημάτων. Σε ότι ακολουθεί επιλύεται το πρόβλημα της εύρωστης προσεγγιστικής ακολουθήσης βηματικής εντολής με μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση[1]-[20].

3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Ενα χρονικά αμετάβλητο γραμμικό σύστημα με μη γραμμικές αβεβαιότητες παρουσιάζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\dot{x}(t) = A(q)x(t) + b(q)u(t) + d(q)z(t) \quad , \quad y(t) = c(q)x(t) \tag{2.1}$$

όπου: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ είναι το διάνυσμα κατάστασης, $u(t) \in \mathbb{R}$ το διάνυσμα των εισόδων, $y(t) \in \mathbb{R}$ το διάνυσμα των εξόδων του συστήματος και $z(t) \in \mathbb{R}$ είναι ένα πολυωνυμικό διάνυσμα το οποίο έχει την ιδιότητα ότι $z^{(r)}(t) = 0$. Οι πίνακες $A(q) \in [\wp(q)]^{n \times n}$, $b(q) \in [\wp(q)]^{n \times 1}$, $d(q) \in [\wp(q)]^{n \times 1}$ και $c(q) \in [\wp(q)]^{1 \times n}$ είναι πίνακες συναρτήσεων οι οποίοι εξαρτώνται από το αβέβαιο διάνυσμα $q = [q_1 \quad \dots \quad q_l] \in \mathbb{Q}$ (\mathbb{Q} συμβολίζει το αβέβαιο πεδίο). Το σύνολο $\wp(q)$ είναι ένα σύνολο μη γραμμικών συναρτήσεων των q . Οι αβέβαιες παράμετροι q_1, \dots, q_l δεν εξαρτώνται από τον χρόνο.

3.2 Πολυωνυμικό σήμα αναφοράς

Θεωρώντας ότι το σήμα εξόδου $y_r(t)$, είναι ένα πολυωνυμικό σήμα και ότι:

$$y_r^{(r)}(t) = 0 \tag{2.2}$$

Το σφάλμα ακολουθήσης εντολής έχει την παρακάτω μορφή:

$$e(t) = y(t) - y_r(t) \tag{2.3}$$

Παραγωγίζοντας την σχέση (2.3) r -φορές προκύπτει:

$$e^{(r)}(t) = y^{(r)}(t) = c(q)x^{(r)}(t) \quad (2.4)$$

Ορίζοντας τις ακόλουθες σχέσεις

$$z(t) = x^{(r)}(t) \quad , \quad \bar{u}(t) = u^{(r)}(t) \quad (2.5)$$

και σύμφωνα με τις σχέσεις (2.4), (2.5) και την σχέση $z^{(r)}(t) = 0$ το σύστημα που περιγράφεται από την σχέση (2.1) μπορεί να επαυξηθεί με την δυναμική εξίσωση του σφάλματος ακολούθησης σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{d}{dt} \bar{x}(t) = \bar{A}(q) \bar{x} + \bar{b}(q) \bar{u}(t) \quad (2.6)$$

όπου:

$$\bar{x}(t) = [e(t) \quad e^{(1)}(t) \quad \dots \quad e^{(r-1)}(t) \quad z(t)]^T \quad (2.7)$$

$$\bar{A}(q) = \begin{bmatrix} 0_{(r-1) \times 1} & I_{r-1} & 0 \\ 0 & 0_{1 \times (r-1)} & c(q) \\ 0 & 0_{n \times (r-1)} & A(q) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\bar{b}(q) = \begin{bmatrix} 0_{r \times 1} \\ b(q) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Στο επαυξημένο σύστημα της σχέσης (2.6) εφαρμόζεται στατικός ελεγκτής ανατροφοδότησης κατάστασης της ακόλουθης μορφής:

$$\bar{u}(t) = f \bar{x}(t) = f_1 \bar{e}(t) + f_2 z(t) \quad (2.10)$$

όπου: $\bar{e}(t) = [e(t) \quad e^{(1)}(t) \quad \dots \quad e^{(r-1)}(t)]^T$, $f_1 \in \mathbb{R}^{1 \times r}$ και $f_2 \in \mathbb{R}^{1 \times n}$.

Η επίλυση του προβλήματος της εύρωστη προσεγγιστική ακολούθηση εντολής διατυπώνεται στον ακόλουθο ορισμό:

Λήμμα 2.1: Το πρόβλημα της εύρωστης προσεγγιστικής ακολούθησης εξωτερικής εντολής είναι επιλύσιμο, δηλαδή η έξοδος του εύρωστου συστήματος που περιγράφεται από την σχέση (2.1) ακολουθεί την έξοδο από το σύστημα αναφοράς (2.6), καθώς το σφάλμα ακολούθησης (2.3) τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν, εάν υπάρχει ένας στατικός ελεγκτής ανατροφοδότησης κατάστασης ($\bar{u}(t) = f \bar{x}(t)$) τέτοιος ώστε το αβέβαιο πολυώνυμο που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση είναι πάντα εύρωστα ευσταθές.

$$\bar{p}_{cl}(s, q, f) = \det[sI_{r+n} - \bar{A}(q) - \bar{b}(q)f] \quad (2.11)$$

Το σήμα ελέγχου μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση:

$$u(t) = f_{1,1} \int_{\tau=0}^t \dots \int_{\tau=0}^t [e(\tau) d\tau] + f_{1,2} \int_{\tau=0}^t \dots \int_{\tau=0}^t [e(\tau) d\tau] + \dots + f_{1,r} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau + f_2 x(t) \quad (2.12)$$

όπου: $f_{1,i}$ ($i = 1, \dots, r$) είναι τα στοιχεία του πίνακα f [A.7],[B.4],[B.5],[B.6].

3.3 Συνθήκες επίλυσης

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο που περιγράφεται από την σχέση (2.11) μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$\tilde{p}_{cl}(s, q, f) = \det[sI_{n+r} - \tilde{A}(q)] - f \operatorname{adj}[sI_{n+r} - \tilde{A}(q)] \tilde{b}(q) \quad (2.13)$$

Ορίζοντας:

$$\tilde{a}(q) = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_0(q) & \cdots & \tilde{a}_{n-1}(q) & 0_{1 \times r} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

όπου: $\tilde{a}_i(q)$ ($i = 0, \dots, n-1$) είναι οι συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου του συστήματος ανοιχτού βρόχου που παρουσιάζεται στην σχέση (2.1). Ακολούθως ορίζεται ο ακολούθως πολυωνομικός πίνακας:

$$\tilde{P}(s, q) = \Omega(q) [s^{\mu(q)} \cdots s^0]^T = \operatorname{adj}[sI_{n+r} - \tilde{A}(q)] \tilde{b}(q) \quad (2.15)$$

όπου: $\mu(q) \leq n+r$ είναι ο μέγιστος βαθμός των πολυωνύμων του πίνακα $\operatorname{adj}[sI_{n+r} - \tilde{A}(q)] \tilde{b}(q)$ και

όπου:

$$\Omega(q) = [\omega_0(q) \cdots \omega_{\mu(q)}(q)]; \omega_i(q) = [\tilde{\omega}_{i,1}(q) \cdots \tilde{\omega}_{i,n+r}(q)]^T \quad (2.16)$$

Εφόσον $\det[sI_{n+r} - \tilde{A}(q)] = s^r \det[sI_n - A(q)] = \tilde{a}(q) [s^{n+r} \cdots s^0]^T$ και σύμφωνα με τις σχέσεις (2.14), (2.15) και (2.16) το επαυξημένο χαρακτηριστικό πολυώνυμο κλειστού βρόχου μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{p}_{cl}(s, q, f) = [\tilde{a}(q) - f \tilde{\Omega}(q)] [s^{n+r} \cdots s^0]^T \quad (2.17)$$

όπου:

$$\tilde{\Omega}(q) = \begin{bmatrix} 0_{(n+r) \times (n+r-\mu(q))} & \Omega(q) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

και ισοδύναμα:

$$\tilde{p}_{cl}(s, q, f) = [s^{n+r} \cdots s^0] \left[-[\tilde{\Omega}(q)]^T f^T + \tilde{a}(q)^T \right] \quad (2.19)$$

Ορίζεται ο ακόλουθος πίνακας:

$$A^{**}(q) = \left[\begin{array}{c|c} 1 & 0_{1 \times (n+r)} \\ \hline \tilde{a}_1(q) & 0_{(n+r-\mu(q)-1) \times (n+r)} \\ \hline \tilde{a}_2(q) & -\tilde{\omega}_1(q) \\ \hline 0_{r \times 1} & -\tilde{\omega}_2(q) \end{array} \right] \quad (2.20)$$

όπου:

$$\hat{a}_1(q) = \begin{bmatrix} \tilde{a}_0(q) \\ \vdots \\ \tilde{a}_{n+r-\mu(q)-2}(q) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\hat{a}_2(q) = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{n+r-\mu(q)-1}(q) \\ \vdots \\ \tilde{a}_{n-1}(q) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

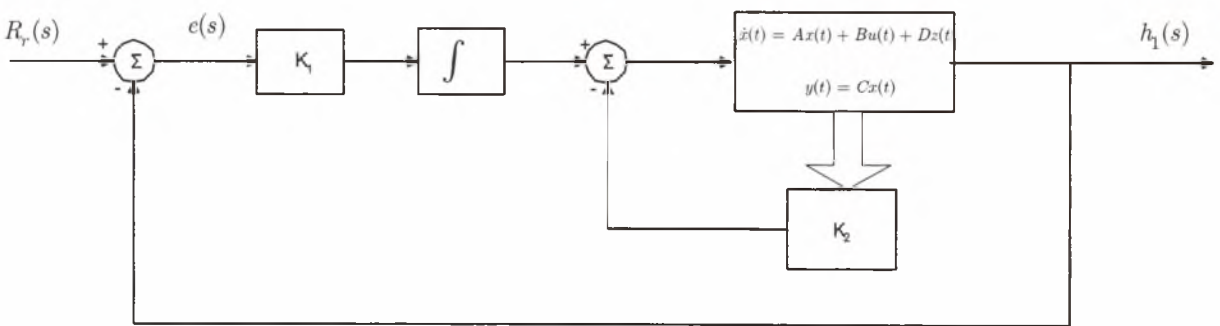
$$\hat{\omega}_1(q) = \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_{0,1}(q) & \cdots & \tilde{\omega}_{0,n+r}(q) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{\omega}_{\mu(q)-r,1}(q) & \cdots & \tilde{\omega}_{\mu(q)-r,n+r}(q) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\hat{\omega}_2(q) = \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_{\mu(q)-r+1,1}(q) & \cdots & \tilde{\omega}_{\mu(q)-r+1,n+r}(q) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{\omega}_{\mu(q),1}(q) & \cdots & \tilde{\omega}_{\mu(q),n+r}(q) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Θεώρημα 1: Το πρόβλημα της εύρωστης προσεγγιστικής ακολούθησης εντολής για το αβέβαιο σύστημα (2.1) μέσω του ελεγκτή (2.12) είναι επιλύσιμο αν ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες.

- Τα στοιχεία του πίνακα $A^{**}(q)$ είναι συνεχείς συναρτήσεις των q για κάθε $q \in \mathbb{Q}$
- Υπάρχουν $(n + r + 1) -$ γραμμές υποπίνακες του πίνακα $A^{**}(q)$, $A^*(q)$, οι οποίοι είναι θετικά αντισυμμετρικοί.

Σημείωση 1: Η τάξη του συστήματος για την οποία ικανοποιείται η συνθήκη (ii) του Θεωρήματος 1, μπορεί να διευρυνθεί εάν, αντί του πίνακα $A^{**}(q)$ δημιουργηθεί ο πίνακας $A^{**}(q)T$, όπου T είναι ένας κατάλληλος, ανεξάρτητος των q και k , αντιστρέψιμος πίνακας.



Σχήμα 23: Διάγραμμα συστήματος κλειστού βρόχου.

3.4 Εφαρμογή εύρωστης προσεγγιστικής ακολούθησης βηματικής εντολής στο μοντέλου του αυλακιού άρδευσης

3.4.1 Δημιουργία διανύσματος κέρδους για το σύστημα του αυλακιού άρδευσης.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η εφαρμογή της εύρωστης προσεγγιστικής ακολούθησης εντολής για το μοντέλο του αυλακιού άρδευσης στηριζόμενοι στην θεωρία που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Αρχικά δημιουργούνται οι επανυξημένοι πίνακες A_{bar} και B_{bar} της σχέσης (2.8) και (2.9) οι οποίοι έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\bar{A}(q) = \begin{bmatrix} 0 & c \\ 0 & A \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\bar{b}(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

όπου:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & 0 & a_{34} \\ a_{41} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{31} \\ b_{41} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Τα $a_{14}, a_{24}, a_{41}, a_{43}, a_{44}, b_{11}, b_{23}, b_{24}$ δίνονται στις σχέσεις (1.43) - (1.62).

Στο επανυξημένο σύστημα που περιγράφεται από την σχέση (2.6) εφαρμόζεται στατικός νόμος ανατροφοδότησης κατάστασης της μορφής $\bar{u}(t) = f \bar{x}(t)$, όπου f :

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το χαρακτηριστικό πολυώνυμο κλειστού βρόχου του επανυξημένου συστήματος $p_{cl}(s, q, f)$, το οποίο δίνεται από την ακόλουθη σχ'εση:

$$p_{cl}(s, q, f) = s^4 + \gamma_0(q, f)s^3 + \gamma_1(q, f)s^2 + \gamma_2(q, f)s^1 + \gamma_3(q, f) \quad (2.30)$$

όπου:

$$\begin{aligned}\gamma_0(q, f) = & \frac{1}{B^2 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3}} K^2 L \left(-3 B f_{21} h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + B f_{22} h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + \right. \\ & + 4 g h_{20} L Q_{20} - B \left(-2 \left(h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} h_{30} K^2 + g L \right) Q_{20} + \right. \\ & \left. \left. + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (k_q L q_0 + 2 (f_{23} Q_{20} + u_{10} - u_{20})) \right) \right) \quad (2.31)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\gamma_1(q, f) = & \frac{1}{B^3 h_{20}^3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3}} K^2 L^2 \left(-4 B^2 (f_{23} - 2) g h_{20}^3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - 3 B^2 f_{11} h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L \right. \\ & + 4 (f_{22} - 3 f_{21}) g h_{20} L Q_{20} + B \left(4 (f_{23} - 2) \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 Q_{20}^2 + f_{21} \left(-6 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (h_{10} - h_{30}) K^2 + \right. \right. \\ & + g L) Q_{20} + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (3 k_q L q_0 + 8 Q_{20} + 6 u_{10} - 6 u_{20})) - f_{22} \left(-2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} (h_{10} - h_{30}) K^2 + \right. \\ & \left. \left. + g L) Q_{20} + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (k_q L q_0 + 8 Q_{20} + 2 u_{10} - 2 u_{20})) \right) \quad (2.32)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\gamma_2(q, f) = & \frac{1}{B^3 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3}} K^2 L^3 \left(-8 B^2 (f_{21} + f_{22}) g h_{20}^3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + 4 Q_{20} (-f_{11} g h_{20} L^2 + 2 (f_{21} + \right. \\ & + f_{22}) \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 Q_{20}) + B f_{11} L \left(-6 (h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 h_{30} + g L) + \right. \\ & \left. \left. + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (3 k_q L q_0 + 8 Q_{20} + 6 u_{10} - 6 u_{20})) \right) \quad (2.33)\end{aligned}$$

$$\gamma_3(q, f) = \frac{8 f_{11} (-B^2 g h_{20}^3 + Q_{20}^2)}{B^3 h_{20}^2 L^3} \quad (2.34)$$

Έπειτα υπολογίζεται ο πίνακας $\bar{a}(q) = \begin{bmatrix} 1 & p_0 & p_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ τα στοιχεία του οποίου, είναι οι συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου του συστήματος ανοιχτού βρόχου $p(s, q)$ της μορφής:

$$p(s, q) = s^3 + p_0 s^2 + p_1 s \quad (2.35)$$

όπου:

$$p_0 = \frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^3} \left(2Bgh_{20} \left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} LQ_{20} + 8gh_{20}^2 \left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} LQ_{20} + B^2(2h_{20}(h_{10} - h_{30})K^2Q_{20} + \right. \\ \left. + 2g \left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} LQ_{20} - h_{20}^2 K^2 (k_q Lq_0 + 2(u_{10} - u_{20})) \right) \quad (2.36)$$

$$p_1 = \frac{8 \left(gh_{20}^3 - \frac{Q_{20}^2}{B^2} \right)}{h_{20}^2 L^2} \quad (2.37)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο πίνακας $\left[-\tilde{\Omega}(q) \right]^T$, ο οποίος έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\left[-\tilde{\Omega}(q) \right]^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\omega}_{22} & \tilde{\omega}_{23} & \tilde{\omega}_{24} \\ \tilde{\omega}_{31} & \tilde{\omega}_{32} & \tilde{\omega}_{33} & \tilde{\omega}_{34} \\ \tilde{\omega}_{41} & \tilde{\omega}_{42} & \tilde{\omega}_{43} & 0 \\ \tilde{\omega}_{51} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

όπου:

$$\tilde{\omega}_{22} = -\frac{3}{BL} \quad (2.39)$$

$$\tilde{\omega}_{23} = \frac{1}{BL} \quad (2.40)$$

$$\tilde{\omega}_{24} = -\frac{2Q_{20}}{Bh_{20}L} \quad (2.41)$$

$$\tilde{\omega}_{31} = -\frac{3}{BL} \quad (2.42)$$

$$\tilde{\omega}_{32} = -\frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}}}} \\ B \left(h_{20} \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}}} K^2 (3k_q Lq_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) - 6 \left(h_{10} K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}}} - h_{30} K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}}} + gL \right) Q_{20} \right) \\ - 12gh_{20}LQ_{20} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_{33} = & \frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^2 \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}}} \\ & - B \left(h_{20} \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} K^2 (k_q L q_0 + 8Q_{20} + 2(u_{10} - u_{20})) - 2 \left(h_{10} K^2 \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} - h_{30} K^2 \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} + gL \right) Q_{20} \right) \\ & + 4gh_{20} L Q_{20}\end{aligned}\quad (2.44)$$

$$\bar{\omega}_{34} = -\frac{4 \left(gh_{20}^3 - \frac{Q_{20}^2}{B^2} \right)}{h_{20}^2 L^2} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_{41} = & \frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^2 \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}}} \\ & B \left(h_{20} \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} K^2 (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) - 6 \left(h_{10} K^2 \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} - h_{30} K^2 \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} + gL \right) Q_{20} \right) \\ & - 12gh_{20} L Q_{20}\end{aligned}\quad (2.46)$$

$$\bar{\omega}_{42} = \bar{\omega}_{43} = \bar{\omega}_{51} = \frac{8Q_{20}^2 - 8B^2 gh_{20}^3}{B^3 h_{20}^2 L^3} \quad (2.47)$$

Στην συνέχεια δημιουργείται ο πίνακας $A^{**}(q)$, ο οποίος έχει την ακόλουθη μορφή:

$$A^{**}(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_0 & 0 & \bar{\omega}_{22} & \bar{\omega}_{23} & \bar{\omega}_{24} \\ p_1 & \bar{\omega}_{31} & \bar{\omega}_{32} & \bar{\omega}_{33} & \bar{\omega}_{34} \\ 0 & \bar{\omega}_{41} & \bar{\omega}_{42} & \bar{\omega}_{43} & 0 \\ 0 & \bar{\omega}_{51} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Τα στοιχεία του οποίου δίνονται στις σχέσεις (2.36), (2.37) και (2.39) - (2.47).

Ακολουθώντας υπολογίζεται ένας πίνακας μετασχηματισμού T ο οποίος θα μετασχηματίζει τον παραπάνω πίνακα. Ο πίνακας T πρέπει να είναι αντιστρέψιμος και ανεξάρτητος των αβεβαιοτήτων. Ο πίνακας μετασχηματισμού T έχει την παρακάτω μορφή:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Η ορίζουσα του πίνακα T είναι διάφορη από το μηδέν ($Det(T) = -1$). Άρα ο πίνακας της σχέσης (2.48) γίνεται:

$$A^{**}(q)T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21}^{**} & a_{22}^{**} & 0 & a_{24}^{**} & a_{25}^{**} \\ a_{31}^{**} & a_{32}^{**} & a_{33}^{**} & a_{34}^{**} & a_{35}^{**} \\ a_{41}^{**} & a_{42}^{**} & a_{43}^{**} & a_{44}^{**} & 0 \\ a_{51}^{**} & a_{52}^{**} & a_{53}^{**} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

όπου:

$$a_{21}^{**} = \frac{1}{B^3 h_{20}^3 K^2 L} ((3K^2 h_{20}^3 - K^2 (k_q L q_0 + 2(u_{10} - u_{20})) h_{20}^2 + 2(h_{10} - h_{30}) K^2 Q_{20} h_{20} + 2g \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20}) B^2 + 8gh_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} + 8gh_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20}) \quad (2.51)$$

$$a_{22}^{**} = a_{33}^{**} = -\frac{3}{BL} \quad (2.52)$$

$$a_{23}^{**} = \frac{1}{BL} \quad (2.53)$$

$$a_{24}^{**} = -\frac{2Q_{20}}{B h_{20} L} \quad (2.54)$$

$$a_{31}^{**} = \frac{1}{B^4 h_{20}^3 K^2 L^2} ((3BK^2 L h_{20}^3 - K^2 (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) h_{20}^2 + 2h_{20} K^2 (3(h_{10} - h_{30}) - 4Q_{20}) Q_{20}) B^2 + 2g \left(4B^4 K^2 h_{20}^4 + 12 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} h_{20}^2 + 12B \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} h_{20} + 3B^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} \right) \quad (2.55)$$

$$a_{32}^{**} = \frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3}} (B(h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} K^2 (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) - 6 \left(- \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} h_{30} K^2 + h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} K^2 + gL \right) Q_{20}) - 12gh_{20} L Q_{20} - 3B^2 L h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} K^2) \quad (2.56)$$

$$a_{34}^{**} = \frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^3 \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}}} \left(-B(h_{20} \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} K^2 (k_q L q_0 + 8Q_{20} + 2(u_{10} - u_{20})) - \right. \quad (2.57)$$

$$\left. -2\left(-\sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}}\right) h_{30} K^2 + h_{10} \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} K^2 + gL) Q_{20} \right) + 4gh_{20} L Q_{20} \right) \\ a_{35}^{**} = -\frac{4 \left(gh_{20}^3 - \frac{Q_{20}^2}{B^2} \right)}{h_{20}^2 L^2} \quad (2.58)$$

$$a_{41}^{**} = \frac{1}{B^3 h_{20}^2 L^3} \left[8B^2 gh_{20}^3 + \frac{24gh_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L^2 Q_{20}}{BK^2} + 8 \left[\frac{3g \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L^2}{K^2} - Q_{20} \right] Q_{20} + \right. \\ \left. + BL \left[6(h_{10} - h_{30}) Q_{20} + \frac{6g \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20}}{h_{20} K^2} - h_{20} (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) \right] \right] \quad (2.59)$$

$$a_{42}^{**} = \frac{1}{B^3 h_{20}^2 L^3} \left[-8B^2 gh_{20}^3 - \frac{24gh_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L^2 Q_{20}}{BK^2} + 8 \left[Q_{20} - \frac{3g \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L^2}{K^2} \right] Q_{20} + \right. \\ \left. + BL \left[6(h_{30} - h_{10}) Q_{20} - \frac{6g \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20}}{h_{20} K^2} + h_{20} (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) \right] \right] \quad (2.60)$$

$$a_{43}^{**} = \frac{1}{B^3 h_{20}^2 L^2 K^2} \left(B(h_{20} \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} K^2 (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) - 6\left(-\sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}}\right) h_{30} K^2 + \right. \\ \left. + h_{10} \sqrt[3]{\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}}} K^2 + gL) Q_{20} \right) - 12gh_{20} L Q_{20} \quad (2.61)$$

$$a_{44}^{**} = a_{51}^{**} = a_{52}^{**} = a_{53}^{**} = \frac{8B^2 gh_{20}^3 - 8Q_{20}^2}{B^3 h_{20}^2 L^3} \quad (2.62)$$

Αφαιρώντας την τέταρτη και την πέμπτη στη του πίνακα της σχέσης (2.50) προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

$$A^*(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a_{21}^{**} & a_{22}^{**} & 0 \\ a_{31}^{**} & a_{32}^{**} & a_{33}^{**} \\ a_{41}^{**} & a_{42}^{**} & a_{43}^{**} \\ a_{51}^{**} & a_{52}^{**} & a_{53}^{**} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Τα στοιχεία του πίνακα $A^*(q)$ δίνονται στις σχέσεις (2.51) - (2.62)

Ο πίνακας $A^*(q)$ είναι θετικά ορισμένες και μπορεί να δημιουργηθεί κάνοντας δύο θετικές άνω επαυξήσεις:

$$\Phi_1(q) \rightarrow \Phi_2(q) \rightarrow A^*(q) \quad (2.64)$$

όπου:

$$\Phi_1(q) = \begin{bmatrix} a_{33}^{**} \\ a_{43}^{**} \\ a_{53}^{**} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$\Phi_2(q) = \begin{bmatrix} a_{22}^{**} & 0 \\ a_{32}^{**} & a_{33}^{**} \\ a_{42}^{**} & a_{43}^{**} \\ a_{52}^{**} & a_{53}^{**} \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

Το διάνυσμα $\bar{c}(q) = \Phi_1(q)$ είναι ένας Hurwitz αμετάβλητος πυρήνας., έτσι και το πολυώνυμο $[\bar{c}(q)]^T \begin{bmatrix} s^2 & s & 1 \end{bmatrix}^T$ είναι θετικά αμετάβλητο κατά Hurwitz.

3.4.2 Υπολογισμός των παραμέτρων του ελεγκτή.

3.4.2.1 Υπολογισμός της παραμέτρου ε_1

Κάνοντας μία θετική άνω επαύξηση δημιουργείται η μήτρα $\Phi_2(q)$. Από την μήτρα $\Phi_2(q)$ προκύπτει το ακόλουθο πολυώνυμο:

$$\begin{bmatrix} s^3 & s^2 & s & 1 \end{bmatrix} \Phi_2(q) \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Το οποίο μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

$$a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \quad (2.68)$$

όπου:

$$a_3 = -\frac{3\varepsilon_1}{BL} \quad (2.69)$$

$$a_2 = \frac{1}{B^3 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L^2} (-3B(1 + \varepsilon_1) h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L - 12\varepsilon_1 g h_{20} L Q_{20} +$$

$$B\varepsilon_1 (-6(h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} h_{30} K^2 + gL) Q_{20} + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (8Q_{20} +$$

$$+ 3k_q L q_0 + 6(u_{10} - u_{20}))) \quad (2.70)$$

$$a_1 = \frac{1}{B^3 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L^3} (-8B\varepsilon_1 g h_{20}^3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + 4Q_{20} (-3(1 + \varepsilon_1) g h_{20} L^2 +$$

$$+ 2\varepsilon_1 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 Q_{20}) + B(1 + \varepsilon_1) L (-6(h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} h_{30} K^2 +$$

$$+ gL) Q_{20} + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})))) \quad (2.71)$$

$$a_0 = -\frac{8(1 + \varepsilon_1)(B^2 g h_{20}^3 - Q_{20}^2)}{B^3 h_{20}^2 L^3} \quad (2.72)$$

3.4.2.2 Εύρεση ευστάθειας πολυωνύμου για τις διάφορες τιμές του ε_1

Εφαρμόζοντας το κριτήριο του Routh στην σχέση (2.68) βρίσκεται η περιοχή των ε_1 για τα οποία το πολυώνυμο (2.68) είναι ευσταθές. Έτσι ο πίνακας του Routh παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\begin{array}{c|cc} s^3 & a_3 & a_1 & 0 \\ s^2 & a_2 & a_0 & 0 \\ s^1 & b_1 & 0 & 0 \\ s^0 & c_1 & & \end{array} \quad (2.73)$$

Όπου a_0, a_1, a_2, a_3 δίνονται στις σχέσεις (2.69) - (2.72) και b_1, c_1 δίνονται στους παρακάτω τύπους:

$$b_1 = -\frac{\begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_2 & a_0 \end{vmatrix}}{a_2} \quad (2.74)$$

$$c_1 = -\frac{\begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = a_0 \quad (2.75)$$

Για να είναι το σύστημα ευσταθές για κάθε ε_1 θα πρέπει, σύμφωνα με το κριτήριο του Routh, η πρώτη στήλη του πίνακα Routh να μην παρουσιάζει εναλλαγή προσήμου. Άρα επειδή το πρώτο στοιχείο της στήλης του πίνακα το Routh είναι θετικό ($a_3 = \varepsilon_1 > 0$) θα πρέπει όλα τα στοιχεία της πρώτης στήλης του πίνακα Routh να είναι θετικά. Έτσι πρέπει να ισχύει $a_3 > 0, a_2 > 0, b_1 > 0, c_1 > 0$. Λύνοντας το σύστημα των τεσσάρων ανισόσεων ως προς ε_1 βρίσκουμε την περιοχή του ε_1 για την οποία το πολυώνυμο της σχέσης (2.68) είναι ευσταθές. Αυτό επιτυγχάνεται όταν $\varepsilon_1 > 0$. Επιλέγουμε $\varepsilon_1 = 100$

3.4.2.3 Υπολογισμός της παραμέτρου ε_2

Κάνοντας άλλη μία θετική άνω επαύξηση προκύπτει η μήτρα $A^*(q)$. Από την μήτρα $A^*(q)$ προκύπτει το παρακάτω πολυώνυμο το οποίο μπορεί να γραφεί:

$$\begin{bmatrix} s^4 & s^3 & s^2 & s & 1 \end{bmatrix} A^*(q) \begin{bmatrix} \varepsilon_2 \\ \varepsilon_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

Το οποίο μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

$$a_{41}s^4 + a_{31}s^3 + a_{21}s^2 + a_{11}s + a_{01} \quad (2.77)$$

όπου:

$$a_{41} = \varepsilon_2 \quad (2.78)$$

$$\begin{aligned} a_{31} = & \frac{1}{B^2 h_{20}^2 K^2 L \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3}} (4\varepsilon_2 g h_{20} L Q_{20} + (-3\varepsilon_1 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + \varepsilon_2 (2h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + \\ & + 2(h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} h_{30} K^2 + gL) Q_{20} - h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (k_q L q_0 + 2(u_{10} - u_{20})))))) \end{aligned} \quad (2.79)$$

$$\begin{aligned}
a_{21} = & \frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3}} (8 B^3 \varepsilon_2 g h_{20}^3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - 3 B^2 (1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2) h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L + \\
& + 12 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) g h_{20} L Q_{20} + B (\varepsilon_1 (-6 (h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} h_{30} K^2 + g L) Q_{20} + \\
& + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (3 k_q L q_0 + 8 Q_{20} + 6 (u_{10} - u_{20}))) - \varepsilon_2 (2 Q_{20} (-3 h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + \\
& 3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} h_{30} K^2 - 3 g L + 4 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 Q_{20}) + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (3 k_q L q_0 + 8 Q_{20} + 6 (u_{10} - u_{20}))))))
\end{aligned} \tag{2.80}$$

$$\begin{aligned}
a_{11} = & \frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3}} (8 B^3 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) g h_{20}^3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - 4 Q_{20} (3 (1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2) g h_{20} L^2 + \\
& + 2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 Q_{20}) + B (1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2) L (-6 (h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 \\
& - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 h_{30} + g L) Q_{20} + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2 h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (3 k_q L q_0 + 8 Q_{20} + 6 (u_{10} - u_{20}))))))
\end{aligned} \tag{2.81}$$

$$a_{01} = - \frac{8 (1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2) (B^2 g h_{20}^3 - Q_{20}^2)}{B^3 h_{20}^2 L^3} \tag{2.82}$$

3.4.2.4 Εύρεση ευστάθειας πολυωνύμου για τις διάφορες τιμές του ε_2

Εφαρμόζοντας το κριτήριο του Routh στην σχέση (2.77) βρίσκεται η περιοχή των ε_1 για τα οποία το πολυώνυμο (2.77) είναι ευσταθές. Έτσι ο πίνακας του Routh παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\begin{array}{c|ccc}
s^4 & a_{41} & a_{21} & a_{01} \\
s^3 & a_{31} & a_{11} & 0 \\
s^2 & b_1 & b_2 & 0 \\
s^1 & c_1 & 0 & 0 \\
s^0 & a_{01} & 0 & 0
\end{array} \tag{2.83}$$

Όπου $a_{01}, a_{11}, a_{21}, a_{31}, a_{41}$ δίνονται στις σχέσεις (2.78) - (2.82) και b_1, b_2, c_1 δίνονται στους παρακάτω τύπους:

$$b_1 = -\frac{\begin{vmatrix} a_{41} & a_{21} \\ a_{31} & a_{11} \end{vmatrix}}{a_{31}} \quad (2.84)$$

$$b_2 = -\frac{\begin{vmatrix} a_{41} & a_{01} \\ a_{31} & 0 \end{vmatrix}}{a_{31}} \quad (2.85)$$

$$c_1 = -\frac{\begin{vmatrix} a_{31} & a_{11} \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix}}{b_1} \quad (2.86)$$

Για να είναι το σύστημα ευσταθές για κάθε ε_2 θα πρέπει, σύμφωνα με το κριτήριο του Routh, η πρώτη στήλη του πίνακα Routh να μην παρουσιάζει εναλλαγή προσήμου. Άρα επειδή το πρώτο στοιχείο της στήλης του πίνακα το Routh είναι θετικό ($a_{41} = \varepsilon_2 > 0$) θα πρέπει όλα τα στοιχεία της πρώτης στήλης του πίνακα Routh να είναι θετικά. Έτσι πρέπει να ισχύει $a_{41} > 0, a_{31} > 0, b_1 > 0, c_1 > 0, a_{01} > 0$. Λύνοντας το σύστημα των τεσσάρων ανισώσεων ως προς ε_2 βρίσκουμε την περιοχή του ε_1 για την οποία το πολυώνυμο της σχέσης (2.77) είναι ευσταθές. Αυτό επιτυγχάνεται όταν $\varepsilon_2 > 101$. Επιλέγουμε $\varepsilon_2 = 200$.

3.4.2.5 Υπολογισμός ελεγκτή

Για τον υπολογισμό του διανύσματος κέρδους f αρχικά πρέπει να υπολογιστεί το διάνυσμα \tilde{f} , το οποίο ευσταθειοποιεί εύρωστα το πολυώνυμο $A^{**}(q)T\tilde{f}^T$:

$$\tilde{f} = [\varepsilon_2 \quad \varepsilon_1 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \quad (2.87)$$

Συνεπώς το διάνυσμα κέρδους, το οποίο εύρωστα ευσταθειοποιεί το συσχετιζόμενο πολυώνυμο $A^{**}(q_1, q_2, q_3, q_4)$ είναι:

$$\begin{bmatrix} 1 & f \end{bmatrix} = \frac{T\tilde{f}^T}{\varepsilon_2} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} & 0 & \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_2} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.88)$$

Τέλος δίνοντας τις τιμές στα ε_1 και ε_2 , που υπολογίστηκαν στις ενότητες 3.4.2.2 και 3.4.2.4, προκύπτει ότι το διάνυσμα κέρδους για το επαυξημένο σύστημα είναι:

$$f = \begin{bmatrix} -\frac{61}{10} & 0 & 6 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

Η σχέση που περιγράφει το νόμο ελέγχου φαίνεται παρακάτω:

$$u(t) = K_1 \int_0^t e(\tau) d\tau + K_2 x(t) \quad (2.90)$$

όπου οι συντελεστές K_1 και K_2 προκύπτουν από το διάνυσμα κέρδους της σχέσης (2.89) και έχουν τις τιμές που φαίνονται παρακάτω:

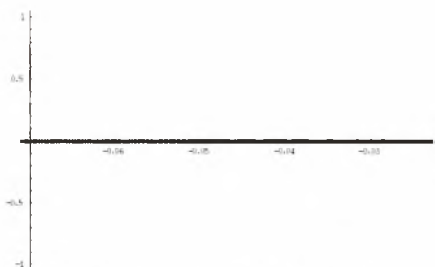
$$K_1 = -\frac{61}{10} \quad (2.91)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 0 & 6 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.92)$$

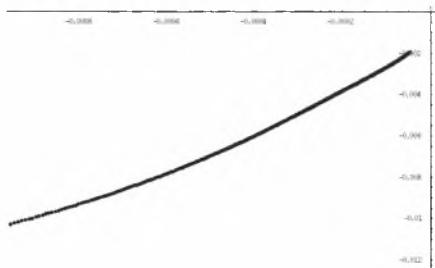
Αντικαθιστώντας τα K_1 και K_2 στην σχέση (2.90), ο νόμος ελέγχου γίνεται:

$$u(t) = -\frac{61}{10} \int_0^t e(\tau) d\tau + \begin{bmatrix} 0 & 6 & 0 \end{bmatrix} x(t) \quad (2.93)$$

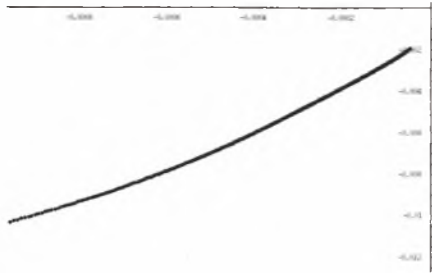
Διαγράμματα των ριζών του συστήματος κλειστού βρόχου μετά την εφαρμογή του νόμου ελέγχου της σχέσης (2.93) για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων:



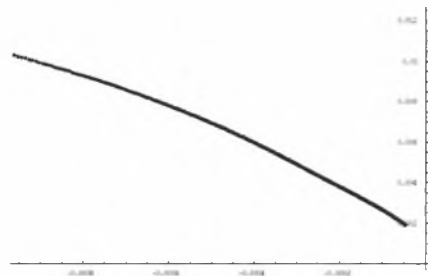
Σχήμα 24: Πρώτη ρίζα του συστήματος



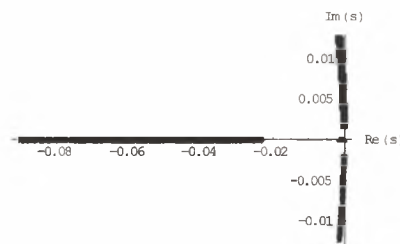
Σχήμα 25: Δεύτερη ρίζα του συστήματος



Σχήμα 26: Τρίτη ρίζα του συστήματος



Σχήμα 27: Τέταρτη ρίζα του συστήματος



Σχήμα 28: Συνολικό διάγραμμα ριζών του συστήματος κλειστού βρόχου

3.5 Προσομοίωση Συστήματος Κλειστού Βρόχου

3.5.1 Προσομοίωση γραμμικού συστήματος.

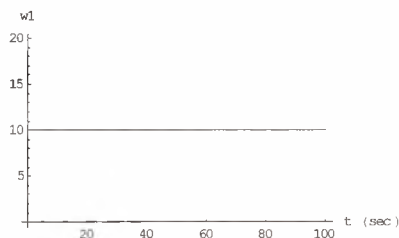
Εφαρμόζοντας στον νόμο ελέγχου της σχέσης (2.93) στο σύστημα της σχέσης (1.38) προκύπτει το παρακάτω σύστημα κλειστού βρόχου:

$$\Delta \dot{x}(t) = (A(q) + B(q)K_2)\Delta x(t) + B(q)K_1 \int_0^t e(\tau)d\tau + D * q \quad (2.94)$$

$$y(t) = C(q)\Delta x(t) \quad (2.95)$$

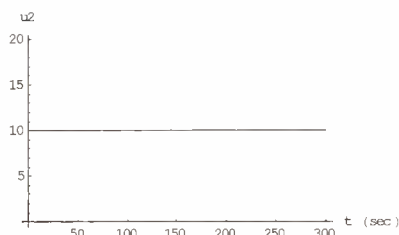
Ακόμη για την προσομοίωση του συστήματος, χρησιμοποιούνται για τις παραμέτρους του συστήματος, οι τιμές του πίνακα 1, ενώ η τιμή της αβεβαιότητας του συστήματος μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών $q_1 \in [q_1^- \quad q_1^+]$ και $q_2 \in [q_2^- \quad q_2^+]$, όπου $q_1^- = 1[m]$, $q_1^+ = 4[m]$, $q_2^- = 1000[m]$ και $q_2^+ = 10000[m]$.

Το Block διάγραμμα του κλειστού συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 23. Το σύστημα κλειστού βρόχου διεγείρεται με εντολή εισόδου $w(t) = [w_1]^T$ όπου w_1 είναι μία συνάρτηση η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



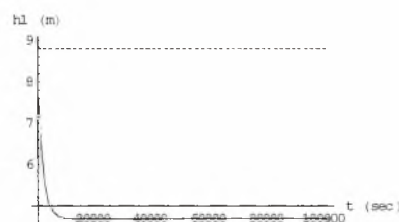
Σχήμα 29: Εντολή Εισόδου w_1

Η δεύτερη είσοδος του συστήματος λαμβάνεται ως διαταραχή με την ακόλουθη μορφή

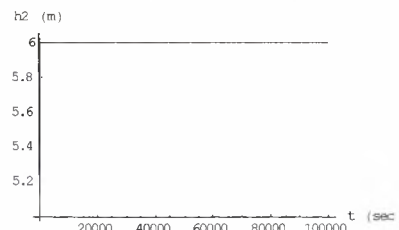


Σχήμα 30: Εντολή Εισόδου u_2

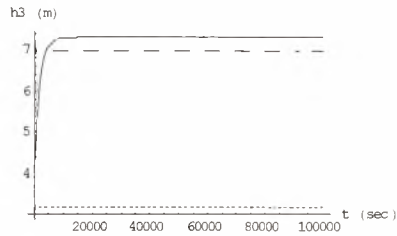
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η στικτή γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



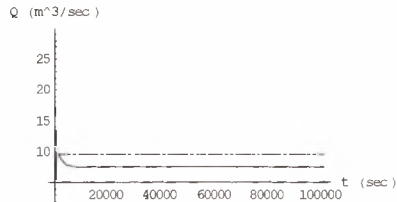
Σχήμα 31: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 32: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού



Σχήμα 33: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού



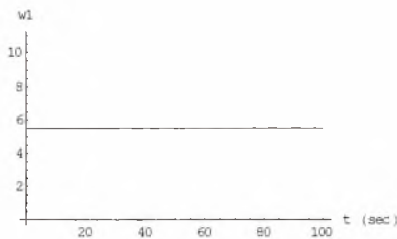
Σχήμα 34: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

3.5.2 Προσομοίωση μη γραμμικού συστήματος.

Στην ενότητα αυτή θα γίνει η προσομοίωση του μη γραμμικού συστήματος χρησιμοποιώντας τον γραμμικό νόμο ελέγχου που υπολογίσαμε για το γραμμικό σύστημα (σχέση (2.93)).

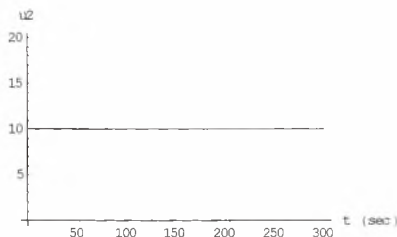
Το μη γραμμικό σύστημα κλειστού βρόχου διεγείρεται με εντολή εισόδου

$w(t) = [w_1 \ w_2]^T$ όπου $w_1 = w_2$ είναι μία συνάρτηση η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



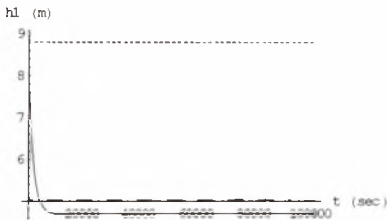
Σχήμα 35: Εντολή Εισόδου w_1

Η δεύτερη είσοδος του συστήματος λαμβάνεται ως διαταραχή με την ακόλουθη μορφή

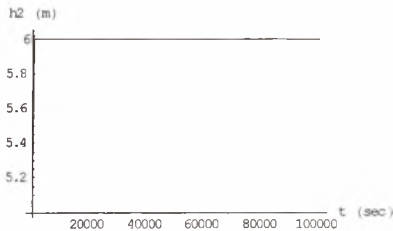


Σχήμα 36: Εντολή Εισόδου u_2

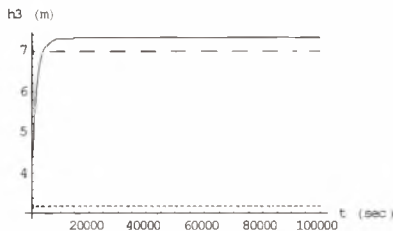
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η στικτή γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



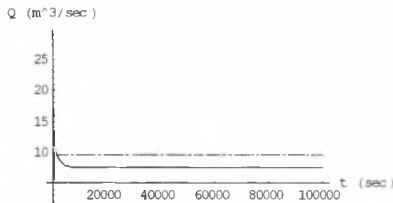
Σχήμα 37: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 38: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού



Σχήμα 39: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού



Σχήμα 40: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως το διάνυσμα κέρδους που δημιουργήθηκε παραπάνω μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για όλες τις περιοχές των αβεβαιοτήτας καθώς παρατηρούμε ότι η δεύτερη

κατάσταση του συστήματος ακολουθεί την επιθυμητή εντολή για όλες τις τιμές των αβεβαιοτήτων. Άρα ο σχεδιαστικός στόχος της προσεγγιστικής ακολούθησης της βηματικής εντολής έχει επιτευχθεί και για το γραμμικό και το μη γραμμικό σύστημα. Ακόμη παρατηρούμε, ύστερα από σύγκριση των διαγραμμάτων των αποκρίσεων του γραμμικού και μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, πως ο γραμμικός ελεγκτής μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και στο μη γραμμικό σύστημα για περιοχές κοντά στο σημείο ισορροπίας.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

-
- [1] IEEE Transactions on Control Systems Technology, 10, 2, March (2002), 288-296.
 - [2] Mattei, M. and Scordamaglia, V., A Full Envelope Small Commercial Aircraft Flight Control Design Using Multivariable Proportional-Integral Control, IEEE Transactions on Control Systems Technology, **16**, 1, Jan. (2008), 169 – 176.
 - [3] Ye, D. and Yang, G.-H., Adaptive Fault-Tolerant Tracking Control Against Actuator Faults With Application to Flight Control, IEEE Transactions on Control Systems Technology, **14**, 6, (Nov. 2006), 1088-1096.
 - [4] Bei Lu, Fen Wu and SungWan Kim, Switching LPV control of an F-16 aircraft via controller state reset, IEEE Transactions on Control Systems Technology, **14**, 2, (March 2006), 267-277.
 - [5] Hedrich, J. K., and Gopalsawami, S., Nonlinear flight control design via sliding methods, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, **13**, 5 (Sept.—Oct. 1990), 850—858.
 - [6] Sign, S. N., Steinberg, M., and Digirolamo, R., Variable structure robust flight control system for the F-14, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **33**, 1 (Jan. 1997), 77—84.
 - [7] Lu, X. Y., Spurgeon, S. K, and Postlethwaite, I., Robust variable structure control of a PVTOL aircraft, *International Journal of Systems Science*, **28**, 6 (1997), 547—558.
 - [8] Jafarov, E.M., Tasaltin R., Robust Sliding-Mode Control for the Uncertain MIMO Aircraft Model F-18, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **36**, 4 (Oct 2000), 1127-1141.
 - [9] K Wei, B. and R. Barmish, “ Making a polynomial Hurwitz invariant by choice of feedback gain”, *Int. J. Contr.* **50** (1989), 1025-1038.
 - [10] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Input -Output decoupling for linear systems with non-linear uncertain structure", *J. of the Franklin Institute*, **333(B)**, (1996), 593-624.
 - [11] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, “Robust Triangular Decoupling with Application to 4WS Cars”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **45**, 2000, 344-352.
 - [12] F. N. Koumboulis, M. P. Tzamtzi, A Metaheuristic Approach for Controller Design of Multivariable Processes, *12th IEEE Inter. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*, Sept 25-28, Patras, Greece, pp. 1429-1432.

- [13] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and N.S. Roussos, "Robust output command tracking for linear systems with non linear uncertain structure with application to flight control", in *Proc. 44th IEEE Conf. Decision Contr., and Europ. Contr. Conf. Seville, Spain 2005*, pp. 7502-7507.
- [14] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, "Robust Tracking and Disturbance Attenuation Controllers for Automatic Steering, *14th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'06)*, June 28-30, 2006, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.
- [15] Ντελλής Αχιλλέας, "Εύρωστος έλεγχος για αυτοκίνητα με τετραδιεύθυνση", Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ ΧΑΛΚΙΔΑΣ, Τμήμα Αυτοματισμού, 2005.
- [16] M. G. Skarpetis, F.N. Koumboulis, A.S Ntellis, G. Chamilothoris, "Robust Asymptotic Output Tracking for Four-Wheel-Steering Vehicles", *3rd IEEE International Conference on Mechatronics (ICM '06)* July 3-5, 2006, Budapest, Hungary.
- [17] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, "Robust Tracking for Time-Varying Uncertain Systems with Application to 4WS Vehicles", *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006- 32nd Annual Conference* on Nov. 2006 Pages: 4689-4694
- [18] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, A.S. Ntellis and Apostolis Sarris, "Robust Controller Design for Active Hydraulic Suspension", *ETFA 2007*
- [19] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, A.S. Ntellis and T.E Tsimos, "Robust Lane Keeping for a Tractor-Trailer", *ETFA 2007*
- [20] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, "Robust Multi Condition Flight Controllers", *16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'08)*, June 25-37, 2008.

4.0 Εύρωστη Ακολουθήση Εντολής με Μηδενικό Σφάλμα Μόνιμης Κατάστασης και Εξασθένιση Διαταραχών

Για την περίπτωση ενός αναρριχητικού σήματος αναφοράς το επαυξημένο σύστημα, με την δυναμική εξίσωση του σφάλματος αναφοράς παρουσιάζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις στο χώρο κατάστασης:

$$\frac{d}{dt} \tilde{x}(t) = \tilde{A}(q) \tilde{x} + \tilde{b}(q) \tilde{u}(t) \quad (3.1)$$

όπου:

$$\tilde{u}(t) = \ddot{u}(t), \quad \tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} e(t) \\ \dot{e}(t) \\ z(t) \end{bmatrix}, \quad z(t) = \ddot{x}(t) \quad (3.2)$$

$$\tilde{A}(q) = \begin{bmatrix} 0_{(r-1) \times 1} & I_{r-1} & 0 \\ 0 & 0_{1 \times (r-1)} & c(q) \\ 0 & 0_{n \times (r-1)} & A(q) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\tilde{b}(q) = \begin{bmatrix} 0_{r \times 1} \\ b(q) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Το σήμα ελέγχου μπορεί να γραφεί με την ακόλουθη μορφή:

$$u(t) = f_{1,1} \int_{\tau=0}^t \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau + f_{1,2} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau + f_2 x(t) \quad (3.5)$$

όπου: $f_{1,1}, f_{1,2} \in \mathbb{R}$ και $f_2 \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ [1]-[20].

4.1 Σχεδίαση ελεγκτή για το μοντέλο του αυλακιού άρδευσης

Για $r = 2$ προκύπτει το ακόλουθο επαυξημένο σύστημα του αυλακιού άρδευσης στον χώρο κατάστασης:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}(q) \tilde{x} + \tilde{b}(q) \tilde{u}(t) \quad (3.6)$$

$$\acute{\alpha}\nu\alpha\upsilon\acute{\alpha}: \tilde{A}(q) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0_{1 \times 3} \\ 0 & 0 & c(q) \\ 0 & 0 & A(q) \end{bmatrix}, \tilde{b}(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b(q) \end{bmatrix}.$$

Στο επαυξημένο σύστημα της εξίσωσης (3.6) εφαρμόζεται στατικός νόμος ανατροφοδότησης κατάστασης της μορφής $\tilde{u} = f\tilde{x}$, όπου:

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του επαυξημένου συστήματος κλειστού βρόχου μετά την εφαρμογή του νόμου ελέγχου έχει την ακόλουθη μορφή:

$$p_{cl}(s, q, f) = s^5 + \gamma_0(q, f)s^4 + \gamma_1(q, f)s^3 + \gamma_2(q, f)s^2 + \gamma_3(q, f)s + \gamma_4(q, f) \quad (3.8)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \gamma_0(q, f) = & \frac{1}{B^2 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L} \left(-3B f_{21} h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + B f_{22} h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + \right. \\ & + 4g h_{20} L Q_{20} - B(-2(h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 h_{30} + gL) Q_{20} + \\ & \left. + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (k_q L q_0 + 2(f_{23} Q_{20} + u_{10} - u_{20}))) \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1(q, f) = & \frac{1}{B^2 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L^2} \left(-4B^3 (f_{23} - 2) g h_{20}^3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - 3B^2 f_{12} h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L + \right. \\ & + 4(f_{22} - 3f_{21}) g h_{20} L Q_{20} + B(4(f_{23} - 2) \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 Q_{20}^2 + f_{21} (-6(h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \\ & - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 h_{30} + gL) Q_{20}) + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20}))) - \\ & + f_{22} (-2(h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 h_{30} + gL) + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (k_q L q_0 + \\ & \left. + 8Q_{20} + 2(u_{10} - u_{20}))) \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \gamma_2(q, f) = & \frac{1}{B^3 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L^3} \left(-B^2 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (8f_{21} g h_{20} + 8f_{22} g h_{20} + 3f_{11} L^2) + \right. \\ & + 4Q_{20} (-3f_{12} g h_{20} L^2 + 2(f_{21} + f_{22}) \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 Q_{20}) + B f_{12} L (-6(h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \\ & \left. - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 h_{30} + gL) + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20}))) \right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \gamma_3(q, f) = & \frac{1}{B^3 h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 L^3} \left(-8B^2 f_{12} g h_{20}^3 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 + 4Q_{20} (-3f_{11} g h_{20} L^2 + \right. \\ & + 2f_{12} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 Q_{20}) + B f_{11} L (-6(h_{10} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 - \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 h_{30} + gL) Q_{20} \\ & \left. + h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{1/3} K^2 (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20}))) \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\gamma_4(q, f) = \frac{8f_{11}(Q_{20}^2 - B^2 g h_{20}^3)}{B^3 h_{20}^2 L^3} \quad (3.13)$$

Το πολυώνυμο του συστήματος κλειστού βρόχου μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

$$\tilde{p}(s, q) = \Omega(q) \begin{bmatrix} s^{\mu(q)} & \dots & s^0 \end{bmatrix}^T = adj[sI_{n+r} - \tilde{A}(q)] \tilde{b}(q) \quad (3.14)$$

Στην συνέχεια ορίζονται οι ακόλουθη πίνακες:

$$\tilde{a}(q) = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_0 & \tilde{a}_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} -\tilde{\Omega}(q) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\omega}_{23} & \tilde{\omega}_{24} & \tilde{\omega}_{25} \\ 0 & \tilde{\omega}_{32} & \tilde{\omega}_{33} & \tilde{\omega}_{34} & \tilde{\omega}_{35} \\ \tilde{\omega}_{41} & \tilde{\omega}_{42} & \tilde{\omega}_{43} & \tilde{\omega}_{44} & 0 \\ \tilde{\omega}_{51} & \tilde{\omega}_{52} & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{\omega}_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_0 = & \frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L} \left(8B g h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} + 8g h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} + B^2 (2h_{20} (h_{10} - h_{30}) K^2 Q_{20} + \right. \\ & \left. + 2g \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} - h_{20}^2 K^2 (k_q L q_0 + 2(u_{10} - u_{20}))) \right) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\tilde{a}_1 = \frac{8 \left(gh_{20}^3 - \frac{Q_{20}^2}{B^2} \right)}{h_{20}^2 L^2} \quad (3.18)$$

$$\tilde{\omega}_{23} = \tilde{\omega}_{32} = \tilde{\omega}_{41} = -\frac{3}{BL} \quad (3.19)$$

$$\tilde{\omega}_{24} = \frac{1}{BL} \quad (3.20)$$

$$\tilde{\omega}_{25} = -\frac{2Q_{20}}{Bh_{20}L} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{33} = \tilde{\omega}_{42} = \tilde{\omega}_{51} = & -\frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}}} (12gh_{20}LQ_{20} + B(6(h_{10}K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} - \\ & -h_{30}K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} + gL)Q_{20} - h_{20}K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} (3k_q Lq_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})))) \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{34} = & -\frac{1}{B^3 h_{20}^2 K^2 L^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}}} (B(h_{20}K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} (k_q Lq_0 + 8Q_{20} + 2(u_{10} - u_{20})) - \\ & -2(h_{10}K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} - h_{30}K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} + gL)Q_{20} - 4gh_{20}LQ_{20}) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\tilde{\omega}_{35} = -\frac{4 \left(gh_{20}^3 - \frac{Q_{20}^2}{B^2} \right)}{h_{20}^2 L^2} \quad (3.24)$$

$$\tilde{\omega}_{43} = \tilde{\omega}_{44} = \tilde{\omega}_{52} = \tilde{\omega}_{61} = -\frac{8B^2 gh_{20}^3 - 8Q_{20}^2}{B^3 h_{20}^2 L^3} \quad (3.25)$$

Ακολούθως ορίζεται ο πίνακας $A^{**}(q)$, σύμφωνα με τον οποίο το πολυώνυμο κλειστού βρόχου (3.8) είναι εύρωστα ευσταθές εάν ο πίνακας $A^{**}(q)$ είναι θετικά αντισυμμετρικός και τα στοιχεία του πίνακα αυτού είναι συνεχείς συναρτήσεις του q για κάθε $q \in [q_{\min}, q_{\max}]$.

$$A^{**}(q) = \left[\tilde{a}(q)^T \mid -[\tilde{\Omega}(q)]^T \right] \quad (3.26)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο πίνακας μετασχηματισμού T ο οποίος μετασχηματίζει τον πίνακα $A^{**}(q)$. Ο πίνακας T πρέπει να είναι αντιστρέψιμος και ανεξάρτητος των αβεβαιοτήτων. Ο πίνακας μετασχηματισμού T έχει την παρακάτω μορφή:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Η ορίζουσα του πίνακα T είναι διάφορη από το μηδέν άρα δημιουργείται ο πίνακας:

$$A^{**}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \phi_1 & \phi_2 & 0 & 0 & \phi_{18} & \phi_{21} \\ \phi_3 & \phi_4 & \phi_5 & 0 & \phi_{19} & \phi_{22} \\ \phi_6 & \phi_7 & \phi_8 & \phi_9 & \phi_{20} & 0 \\ \phi_{10} & \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & 0 & 0 \\ \phi_{14} & \phi_{15} & \phi_{16} & \phi_{17} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Αφαιρώντας την πέμπτη και την έκτη γραμμή του πίνακα $A^{**}T$ προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

$$A^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \phi_1 & \phi_2 & 0 & 0 \\ \phi_3 & \phi_4 & \phi_5 & 0 \\ \phi_6 & \phi_7 & \phi_8 & \phi_9 \\ \phi_{10} & \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} \\ \phi_{14} & \phi_{15} & \phi_{16} & \phi_{17} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \phi_1 = & \frac{1}{B^3 h_{20}^3 K^2 L} (3K^2 h_{20}^3 - K^2 (k_q q_0 L + 2(u_{10} - u_{20})) h_{20}^2 + 2(h_{10} - h_{30}) K^2 Q_{20} h_{20} + \\ & + 2g \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20}) B^2 + 8g h_{20} \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} B + 8g h_{20}^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\phi_2 = \phi_7 = \phi_9 = \frac{3}{BL} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} \phi_3 = & \frac{1}{B^4 h_{20}^3 K^2 L} (K^2 h_{20} B^2 (3BL h_{20}^2 - (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) h_{20} + 2(3(h_{10} - h_{30}) - 4Q_{20}) Q_{20}) + \\ & + 2g(4B^4 K^2 h_{20}^4 + 12 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} h_{20}^2 + 12B \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20} h_{20} + 3B^2 \left(\frac{B h_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{2/3} L Q_{20})) \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\phi_4 = \frac{1}{B^3 L^2 h_{20}^2 K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}}} (3LB^2 h_{20}^2 K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} + B^2 (6(-h_{30} K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} + gL) Q_{20} -$$

$$-h_{20} K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})))) \quad (3.33)$$

$$\phi_6 = \phi_7 = \frac{1}{B^3 L^3 h_{20}^2 K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}}} (3L^2 B^2 h_{20}^2 K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} + 8gB^2 h_{20}^3 K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} - 2Q_{20}^2 K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} -$$

$$-L(B(h_{20} K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) - 6(-K^2 h_{30} \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} + h_{10} K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} +$$

$$+gL) Q_{20}) - 12gh_{20} L Q_{20}) \quad (3.34)$$

$$\phi_8 = \frac{1}{B^3 L^3 h_{20}^2 K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}}} (3LB^2 h_{20}^2 K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} + 12gh_{20} L Q_{20} + B(6(-h_{30} K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} +$$

$$+h_{10} K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} + gL) Q_{20} - h_{20} K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20}))) \quad (3.35)$$

$$\phi_{10} = \phi_{11} = \phi_{12} = \frac{1}{B^3 L^3 h_{20}^2 K^2} (8B^2 gh_{20}^3 + \frac{24g \left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{2/3} L^2 Q_{20} h_{20}}{BK^2} + 8 \left[\frac{3g \left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{2/3} L^2}{K^2} - Q_{20} \right] Q_{20} +$$

$$+BL \left[6(h_{10} - h_{30}) Q_{20} + \frac{6gL Q_{20} \left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{2/3}}{h_{20} K^2} - h_{20} (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20})) \right] \quad (3.36)$$

$$\phi_{13} = \frac{1}{B^3 L^2 h_{20}^2 K^2 \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}}} (12gh_{20} L Q_{20} + B \left[6 \left(-\sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} h_{30} K^2 + h_{10} \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} K^2 \right) + gL \right] Q_{20} -$$

$$-h_{20} \sqrt[3]{\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}}} h_{30} K^2 (3k_q L q_0 + 8Q_{20} + 6(u_{10} - u_{20}))) \quad (3.37)$$

$$\phi_{14} = \phi_{15} = \phi_{16} = \phi_{17} = \frac{8B^2gh_{20}^3 - 8Q_{20}^2}{B^3L^3h_{20}^2} \quad (3.38)$$

Ο πίνακας $A^*(q)$ είναι θετικά αντισυμμετρικός, καθώς μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας τις τρεις θετικές επαυξησεις: $\Phi_1(q) \rightarrow \Phi_2(q) \rightarrow \Phi_3(q) \rightarrow A^*(q)$, όπου

$$\Phi_1(q) = \begin{bmatrix} \phi_9 \\ \phi_{13} \\ \phi_{17} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$\Phi_2(q) = \begin{bmatrix} \phi_5 & 0 \\ \phi_8 & \phi_9 \\ \phi_{12} & \phi_{13} \\ \phi_{16} & \phi_{17} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\Phi_3(q) = \begin{bmatrix} \phi_2 & 0 & 0 \\ \phi_4 & \phi_5 & 0 \\ \phi_7 & \phi_8 & \phi_9 \\ \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} \\ \phi_{15} & \phi_{16} & \phi_{17} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Το διάνυσμα $\bar{c}(q) = \Phi_1(q)$ είναι ένας Hurwitz αμετάβλητος πυρήνας, έτσι το και το πολώνυμο $\begin{bmatrix} s^2 & s^1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \Phi_1$ είναι Hurwitz αμετάβλητο.

4.2 Υπολογισμός των παραμέτρων του ελεγκτή

Ο ελεγκτής ακολουθήσης εντολής θα προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας των ακόλουθο αλγόριθμο:

Βήμα 1: (Κατασκευή των επαυξημένων πινάκων) Ο πυρήνας του πίνακα A^* είναι ο $\bar{c}(q) = \Phi_1(q)$. Ξεκινώντας από το $\Phi_1(q)$ και κάνοντας τρεις θετικές επαυξησεις ο πίνακας $\Phi_4(q) = A^*(q)$ μπορεί να κατασκευαστεί. Θέτουμε $\tau = 1$.

Βήμα 2: (Υπολογισμός του πεδίου του ε_1 για το οποίο το πολυώνυμο $\begin{bmatrix} s^3 & s^2 & s & 1 \end{bmatrix} \cdot \Phi_2 \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ 1 \end{bmatrix}$ είναι

Hurwitz αμετάβλητο) Το πολυώνυμο $\begin{bmatrix} s^3 & s^2 & s & 1 \end{bmatrix} \cdot \Phi_2 \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ 1 \end{bmatrix}$ είναι εύρωστα ευσταθές $\forall \varepsilon_1 > 0$. Επιλέγεται

$\varepsilon_1 = 1$ και θέτουμε το $\tau_2 = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 1 \end{bmatrix}$.

Βήμα 3: Επιλέγοντας $\varepsilon_2 = 50$ το πολυώνυμο $\begin{bmatrix} s^4 & s^3 & s^2 & s & 1 \end{bmatrix} \cdot \Phi_3 \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_2 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$ είναι εύρωστα

ευσταθές. Θέτουμε το $\tau_3 = \begin{bmatrix} \varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 1 \end{bmatrix}$.

Βήμα 4: Επιλέγοντας $\varepsilon_3 = 0.002$ το πολυώνυμο $\begin{bmatrix} s^5 & s^4 & s^3 & s^2 & s & 1 \end{bmatrix} \cdot A^*(q) \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_3 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$ είναι

εύρωστα ευσταθές.

Βήμα 5: (Υπολογισμός του διανύσματος κέρδους) Το διάνυσμα κέρδους \tilde{f} το οποίο ευσταθειοποιεί εύρωστα το πολυώνυμο που σχετίζεται με την σχέση $A^{**}(q)T\tilde{f}^T$ είναι το ακόλουθο:

$$\tilde{f} = \begin{bmatrix} \varepsilon_3 & \varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

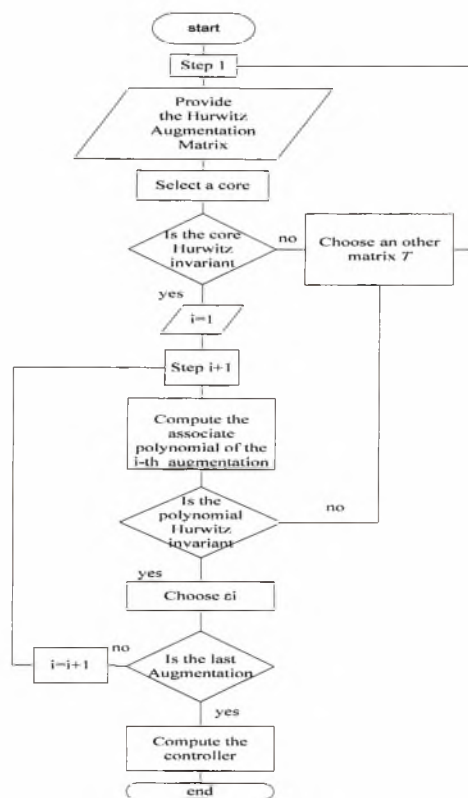
Τελικά το διάνυσμα κέρδους που ευσταθειοποιεί εύρωστα το πολυώνυμο που σχετίζεται με την μήτρα $A^{**}(q)$ είναι το ακόλουθο:

$$\begin{bmatrix} 1 & f \end{bmatrix} = T\tilde{f}^T = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} & \frac{-\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} & \frac{-\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.43)$$

Τελικά ο νόμος ελέγχου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

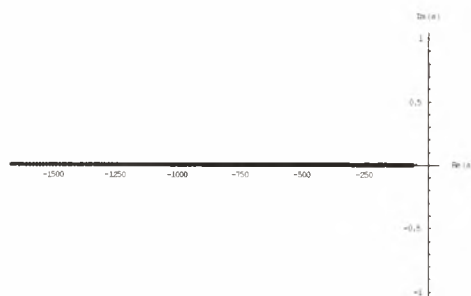
$$u(t) = \frac{-1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \iint e(\tau) d\tau + \frac{-\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \int e(\tau) d\tau + \begin{bmatrix} \frac{-\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) \quad (3.44)$$

Ο παραπάνω αλγόριθμος υπολογισμού των παραμέτρων του ελεγκτή παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα

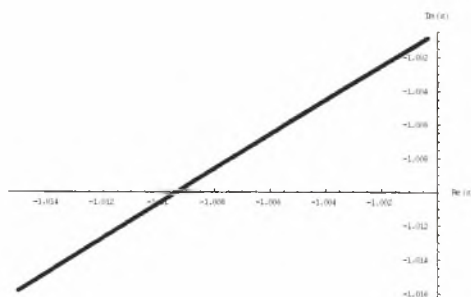


Σχήμα 41: Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ελεγκτή

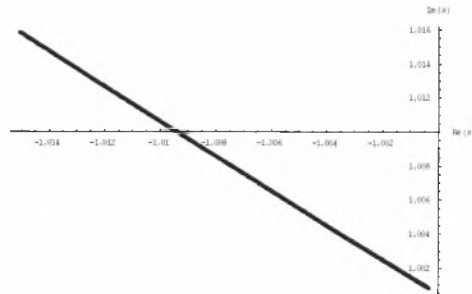
Διαγράμματα των ριζών του συστήματος κλειστού βρόχου μετά την εφαρμογή του νόμου ελέγχου της σχέσης (3.44) για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων:



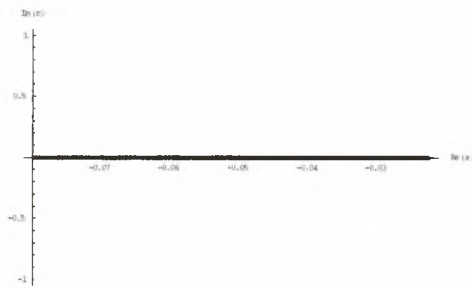
Σχήμα 42: Πρώτος πόλος του συστήματος



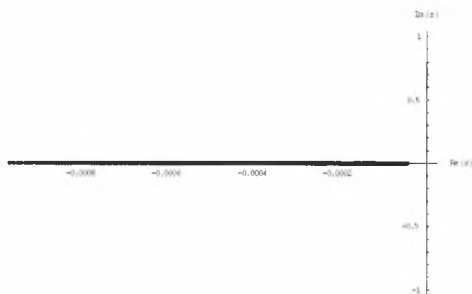
Σχήμα 43: Δεύτερος πόλος του συστήματος



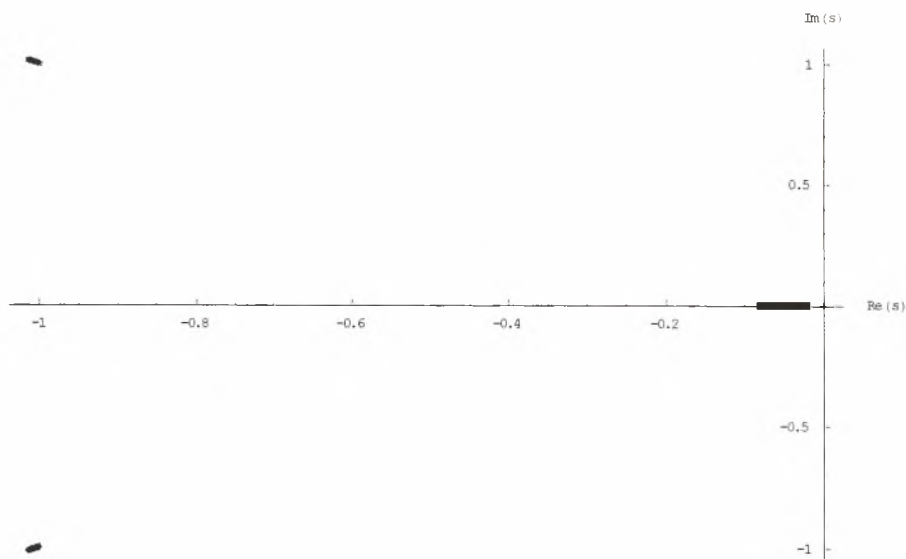
Σχήμα 44: Τρίτος πόλος του συστήματος



Σχήμα 45: Τέταρτος πόλος του συστήματος



Σχήμα 46: Πέμπτος πόλος του συστήματος



Σχήμα 47: Συνολικό διάγραμμα ριζών του συστήματος κλειστού βρόχου

4.3 Προσομοίωση συστήματος

4.3.1 Προσομοίωση γραμμικού συστήματος.

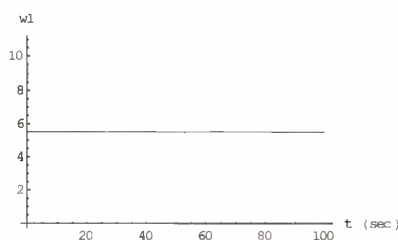
Εφαρμόζοντας στον νόμο ελέγχου της σχέσης (3.44) στο σύστημα της σχέσης (1.38) προκύπτει το παρακάτω σύστημα κλειστού βρόχου:

$$\Delta \dot{x}(t) = (A(q) + B(q)K_3)\Delta x(t) + B(q)K_1 \iint e(\tau) d\tau + B(q)K_2 \int_0^t e(\tau) d\tau + D * q \quad (3.45)$$

$$y(t) = C(q)\Delta x(t) \quad (3.46)$$

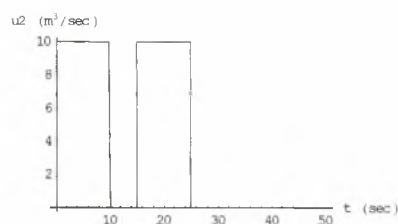
Ακόμη για την προσομοίωση του συστήματος, χρησιμοποιούνται για τις παραμέτρους του συστήματος, οι τιμές του πίνακα 1, ενώ η τιμή της αβεβαιότητας του συστήματος μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών $q_1 \in [q_1^- \ q_1^+]$ και $q_2 \in [q_2^- \ q_2^+]$, όπου $q_1^- = 1[m]$, $q_1^+ = 4[m]$, $q_2^- = 1000[m]$ και $q_2^+ = 10000[m]$.

Το σύστημα κλειστού βρόχου διεγείρεται με εντολή εισόδου $w(t) = w_1$ όπου w_1 είναι μία συνάρτηση η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

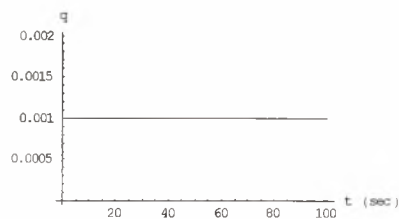


Σχήμα 48: Εντολή Εισόδου w_1

Η συνάρτηση του σήματος διαταραχών παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:

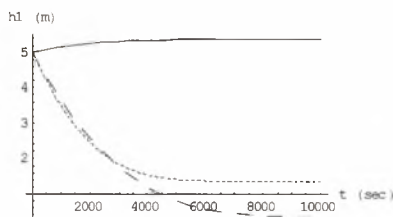


Σχήμα 49: Συνάρτηση διαταραχών u_2

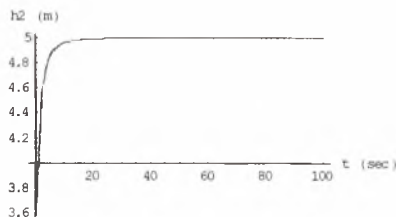


Σχήμα 50: Σήμα διαταραχών

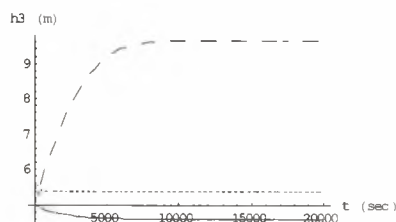
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η στικτή γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



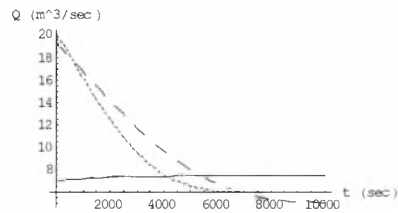
Σχήμα 51: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 52: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού



Σχήμα 53: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού

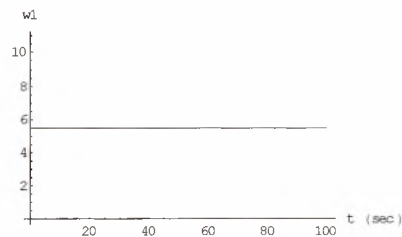


Σχήμα 54: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

4.3.2 Προσομοίωση μη γραμμικού συστήματος.

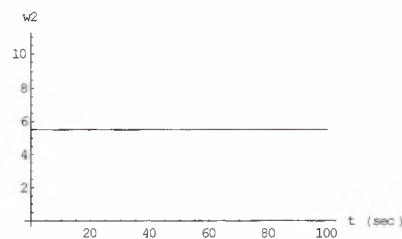
Στην ενότητα αυτή θα γίνει η προσομοίωση του μη γραμμικού συστήματος χρησιμοποιώντας τον γραμμικό νόμο ελέγχου που υπολογίσαμε για το γραμμικό σύστημα (σχέση (3.44)).

Το μη γραμμικό σύστημα κλειστού βρόχου διεγείρεται με εντολή εισόδου $w(t) = w_1$ όπου w_1 είναι μία συνάρτηση η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

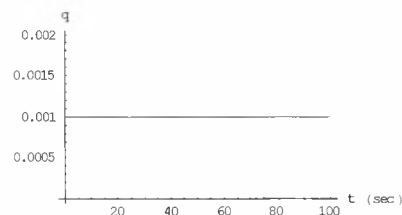


Σχήμα 55: Εντολή Εισόδου w_1

Οι συναρτήσεις των σημάτων των διαταραχών παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα:

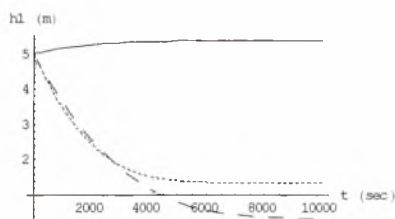


Σχήμα 56: Σήμα διαταραχών

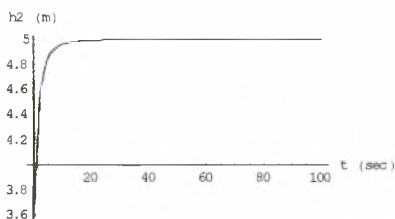


Σχήμα 57: Σήμα διαταραχών

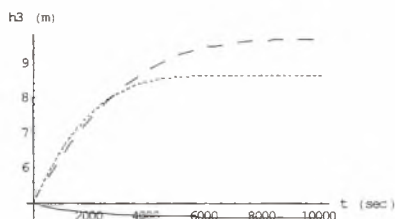
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η στικτή γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



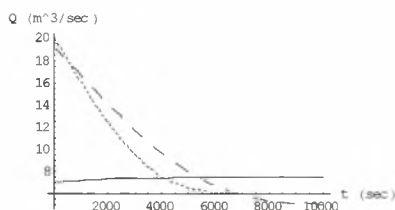
Σχήμα 58: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 59: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού



Σχήμα 60: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού



Σχήμα 61: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως το διάνυσμα κέρδους που δημιουργήθηκε παραπάνω μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για όλες τις περιοχές των αβεβαιότητας καθώς παρατηρούμε ότι η δεύτερη κατάσταση του συστήματος ακολουθεί την επιθυμητή εντολή για όλες τις τιμές των αβεβαιοτήτων. Άρα ο σχεδιαστικός στόχος της προσεγγιστικής ακολούθησης της βηματικής εντολής έχει επιτευχθεί και για το

γραμμικό και το μη γραμμικό σύστημα καθώς επίσης υπάρχει εξασθένιση της επίδραση των διαταραχών (διήθηση) στο σύστημα. Ακόμη παρατηρούμε, ύστερα από σύγκριση των διαγραμμάτων των αποκρίσεων του γραμμικού και μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, πως ο γραμμικός ελεγκτής μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και στο μη γραμμικό σύστημα για περιοχές κοντά στο σημείο ισορροπίας.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] IEEE Transactions on Control Systems Technology, 10, 2, March (2002), 288-296.
- [2] Mattei, M. and Scordamaglia, V., A Full Envelope Small Commercial Aircraft Flight Control Design Using Multivariable Proportional-Integral Control, IEEE Transactions on Control Systems Technology, **16**, 1, Jan. (2008), 169 – 176.
- [3] Ye, D. and Yang, G.-H., Adaptive Fault-Tolerant Tracking Control Against Actuator Faults With Application to Flight Control, IEEE Transactions on Control Systems Technology, **14**, 6, (Nov. 2006), 1088-1096.
- [4] Bei Lu, Fen Wu and SungWan Kim, Switching LPV control of an F-16 aircraft via controller state reset, IEEE Transactions on Control Systems Technology, **14**, 2, (March 2006), 267-277.
- [5] Hedrich, J. K., and Gopalsawami, S., Nonlinear flight control design via sliding methods, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, **13**, 5 (Sept.—Oct. 1990), 850—858.
- [6] Sign, S. N., Steinberg, M., and Digirolamo, R., Variable structure robust flight control system for the F-14, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **33**, 1 (Jan. 1997), 77—84.
- [7] Lu, X. Y., Spurgeon, S. K, and Postlethwaite, I., Robust variable structure control of a PVTOL aircraft, *International Journal of Systems Science*, **28**, 6 (1997), 547—558.
- [8] Jafarov, E.M., Tasaltin R., Robust Sliding-Mode Control for the Uncertain MIMO Aircraft Model F-18, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **36**, 4 (Oct 2000), 1127-1141.
- [9] K Wei, B. and R. Barmish, “ Making a polynomial Hurwitz invariant by choice of feedback gain”, *Int. J. Contr.* **50** (1989), 1025-1038.
- [10] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Input -Output decoupling for linear systems with non-linear uncertain structure", *J. of the Franklin Institute*, **333(B)**, (1996), 593-624.
- [11] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, “Robust Triangular Decoupling with Application to 4WS Cars”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **45**, 2000, 344-352.
- [12] F. N. Koumboulis, M. P. Tzamtzi, A Metaheuristic Approach for Controller Design of Multivariable Processes, *12th IEEE Inter. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*, Sept 25-28, Patras, Greece, pp. 1429-1432.

- [13] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and N.S. Roussos, "Robust output command tracking for linear systems with non linear uncertain structure with application to flight control", in *Proc. 44th IEEE Conf. Decision Contr., and Europ. Contr. Conf. Seville, Spain 2005*, pp. 7502-7507.
- [14] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, "Robust Tracking and Disturbance Attenuation Controllers for Automatic Steering, *14th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'06)*, June 28-30, 2006, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.
- [15] Ντελλής Αχιλλέας, "Εύρωστος έλεγχος για αυτοκίνητα με τετραδιεύθυνση", Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ ΧΑΛΚΙΔΑΣ, Τμήμα Αυτοματισμού, 2005.
- [16] M. G. Skarpetis, F.N. Koumboulis, A.S Ntellis, G. Chamilothis, "Robust Asymptotic Output Tracking for Four-Wheel-Steering Vehicles", *3rd IEEE International Conference on Mechatronics (ICM '06)* July 3-5, 2006, Budapest, Hungary.
- [17] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, "Robust Tracking for Time-Varying Uncertain Systems with Application to 4WS Vehicles", *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006- 32nd Annual Conference on Nov. 2006* Pages: 4689-4694
- [18] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, A.S. Ntellis and Apostolis Sarris, "Robust Controller Design for Active Hydraulic Suspension", *ETFA 2007*
- [19] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, A.S. Ntellis and T.E Tsimos, "Robust Lane Keeping for a Tractor-Trailer", *ETFA 2007*
- [20] M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, "Robust Multi Condition Flight Controllers", *16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'08)*, June 25-27, 2008.

5.0 Διαγώνια αποσύζευξη εισόδων – εξόδων με ανατροφοδότηση κατάστασης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επιλυθεί το πρόβλημα της αποσύζευξης των μεταβλητών h_1 και h_2 με στατικό ελεγκτή ανατροφοδότησης κατάστασης και προενίσχυσης.

5.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόβλημα της Διαγώνιας αποσύζευξης εισόδων-εξόδων με στατικό νόμο ανατροφοδότηση κατάστασης.

Έστω το σύστημα

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad y = Cx(t), \quad x(0-) = x_0 \quad (4.1)$$

όπου $x \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $u \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $y \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Στο πεδίο της συχνότητας το σύστημα (4.1) λαμβάνει την μορφή

$$sX(s) - X(0) = AX(s) + BU(s), \quad Y(s) = CX(s) \quad (4.2)$$

Στο σύστημα (4.2) εφαρμόζεται ο στατικός νόμος ανατροφοδότησης κατάστασης

$$U(s) = FX(s) + GW(s) \quad (4.3)$$

όπου $F \in \mathbb{R}^{m \times n}$, είναι ο πίνακας ανατροφοδότησης και $G \in \mathbb{R}^{m \times m}$ είναι ο πίνακας προενίσχυσης και όπου $W(s)$ είναι η εξωτερική εντολή ελέγχου. Ο σχεδιαστικός στόχος της Διαγώνιας αποσύζευξης εισόδων-εξόδων μέσω ανατροφοδότησης κατάστασης είναι ο προσδιορισμός των πινάκων F και G έτσι ώστε:

$$C[sI_n - A - BF]^{-1}BG = \underset{i=1, \dots, m}{diag} \{h_i(s)\}, \quad h_i(s) \neq 0 \quad (4.4)$$

ή ισοδύναμα, τέτοια ώστε

$$diag\{[h_i(s)]^{-1}\}C[sI_m - A]^{-1}B = G^{-1}\{I_m - F[sI - A]^{-1}B\} \quad (4.5)$$

Για να ικανοποιείται η σχέση (4.4) και η (4.5) είναι αναγκαίο ο πίνακας G να είναι αντιστρέψιμος. Οι πίνακες Γ και Φ ορίζονται ακολούθως:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_m \end{bmatrix} = G^{-1}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_3 \end{bmatrix} = G^{-1}F \quad (4.6)$$

και ορίζονται οι ακόλουθες ποσότητες:

$$d_i = \begin{cases} \min\{j / c_i[A]^j B \neq 0\} & \gamma_i \alpha \quad j = 0, \dots, n-1 \\ n-1 & \varepsilon \alpha \nu \quad c_i[A]^j B = 0 \quad \gamma_i \alpha \quad j \leq n \end{cases} \quad (4.7)$$

$$C^* = \begin{bmatrix} c_1^* \\ \vdots \\ c_2^* \end{bmatrix}, \quad c_i^* = c_i A^{d_i}, \quad A_c = A - \Delta C^* A \quad (4.8)$$

$$\Delta = B[C^* B]^{-1}, \quad L_i = \begin{bmatrix} \Delta_i & A_c \Delta_i & \dots & [A_c]^{2n-1} \Delta_i \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\Delta_i = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \dots & \delta_{i-1} & 0 & \delta_{i+1} & \dots & \delta_m \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

και όπου δ_i είναι η i -οστή στήλη του πίνακα Δ .

Η ικανή και αναγκαία συνθήκη για την επίλυση του προβλήματος της αποσύζευξης εισόδων-εξόδων σε γραμμικά συστήματα της μορφής (4.4) μέσω ενός στατικού νόμου ανατροφοδότησης κατάστασης (4.3) είναι [1]:

$$\det\{C^* B\} \neq 0 \quad (4.11)$$

Αν ισχύει η συνθήκη (4.11) ο πίνακας ανατροφοδότησης F και ο πίνακας προενίσχυσης G του νόμου ελέγχου (4.3) δίνεται από τη σχέση (4.6) όπου τα γ_i και ϕ_i που οδηγούν σε αποσύζευξη εισόδων-εξόδων, προσδιορίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\gamma_i = p_{i,0} c_i^* B \quad (4.12)$$

$$(\phi_i + p_{i,0} c_1^* A) L_i = 0 \quad (4.13)$$

και περιορίζονται από τη συνθήκη

$$\det \Gamma \neq 0 \quad (4.14)$$

Για να ισχύει η αποσύζευξη πρέπει να ικανοποιούνται οι εξισώσεις (4.12) και (4.13) και η συνθήκη (4.14). Το αποσυζευγμένο σύστημα κλειστού βρόχου επίσης παραμετροποιείται από τις ακόλουθες εξισώσεις [1]:

$$h_i(s) = p_i^{-1} s^{d_i+1}, \quad p_i(s) = p_{i,0} + p_{i,1} s^{-1} + \dots \quad (4.15)$$

$$[p_{i,1} \dots p_{i,2n}] = -\{p_{i,0} c_i^* A + \phi_i\} [\delta_i \quad A_c \delta_i \dots [A_c]^{2n-1} \delta_i], p_{i,0} : \text{αυθαίρετα} \quad (4.16)$$

5.2 Διαγώνια αποσύζευξη για το μοντέλο του καναλιού άρδευσης

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί το πρόβλημα της αποσύζευξης των μεταβλητών $h_1(t)$ και $h_2(t)$ του συστήματος άρδευσης. Το πρόβλημα θα επιλυθεί με στατικό ελεγκτή ανατροφοδότησης κατάστασης και προενίσχυσης της μορφής (4.3).

Αρχικά υπολογίζεται ο πίνακας C^* , ορίζοντας τις παραμέτρους d_i , σύμφωνα με την σχέση (4.7).

Για την περίπτωση του συστήματος άρδευσης η σχέση (4.7) ικανοποιείται όταν $d_1 = d_2 = 0$, δηλαδή $c_1^* = c_1 A^0$ και $c_2^* = c_2 A^0$ δηλαδή $c_1^* = c_1$ και $c_2^* = c_2$, όπου c_1, c_2 η πρώτη και η δεύτερη γραμμή του πίνακα C . Άρα ο πίνακας C^* θα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$C^* = \begin{bmatrix} c_1^* \\ c_2^* \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Θεώρημα 4.2.1. Το πρόβλημα της αποσύζευξης των εξόδων $h_1(t)$ και $h_2(t)$ εξαρτάται από τις εισόδους u_1, u_2 . Η ικανή και αναγκαία συνθήκη για την επίλυση του προβλήματος της αποσύζευξης εισόδων-εξόδων για το μοντέλο του καναλιού άρδευσης ισχύει πάντα ((4.11)).

Απόδειξη: Από την σχέση (4.11) προκύπτει:

$$\det \{C^* B\} = -\frac{8}{B^2 L^2} \quad (4.18)$$

Η σχέση (4.18) είναι πάντα διάφορη από το μηδέν για οποιαδήποτε τιμή των B και L (Πίνακας 1).

$$\det \{C^* B\} \neq 0 \quad (4.19)$$

5.3 Γενική λύση των πινάκων ανατροφοδότησης και προενίσχυσης

Ο πίνακας ανατροφοδότησης F και ο πίνακας προενίσχυσης G της σχέσης (4.3) προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων (4.12) και (4.13). Για τον υπολογισμό του πίνακα F υπολογίζεται πρώτα ο πίνακας Δ , ο οποίος υπολογίζεται από την σχέση (4.9):

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{Q_{20}}{h_{20}} & \frac{Q_{20}}{h_{20}} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Από την σχέση (4.9) υπολογίζονται και οι ακόλουθοι πίνακες:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & \frac{Q_{20}}{h_{20}} \end{vmatrix} \quad (4.21)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{Q_{20}}{h_{20}} & 0 \end{vmatrix} \quad (4.22)$$

Από τις γενικές εκφράσεις των γ_i και ϕ_i που οδηγούν σε αποσύζευξη εισόδων - εξόδων, προσδιορίζονται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\gamma_1 = p_{1,0} c_1^* B \quad (4.23)$$

$$\gamma_2 = p_{2,0} c_2^* B \quad (4.24)$$

Όπου προκύπτει:

$$\gamma_i = \left| \frac{3p_{1,0}}{BL} \quad \frac{p_{1,0}}{BL} \right| \quad (4.25)$$

και

$$\gamma_2 = \left| \frac{-p_{2,0}}{BL} \quad -\frac{3p_{2,0}}{BL} \right| \quad (4.26)$$

Η συνολική έκφραση του πίνακα Γ έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\Gamma = \begin{vmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{3p_{1,0}}{BL} & \frac{p_{1,0}}{BL} \\ -\frac{p_{2,0}}{BL} & -\frac{3p_{2,0}}{BL} \end{vmatrix} \quad (4.27)$$

Στην συνέχεια ορίζεται ο πίνακας G :

$$G = \Gamma^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{3BL}{8p_{1,0}} & \frac{BL}{p_{2,0}} \\ -\frac{BL}{8p_{1,0}} & -\frac{3BL}{8p_{2,0}} \end{vmatrix} \quad (4.28)$$

Ο πίνακας A_c υπολογίζεται από την εξίσωση (4.8)

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{Bgh_{20}}{L} - \frac{Q_{20}^2}{Bh_{20}^2L} & \frac{Q_{20}^2 - B^2gh_{20}^3}{Bh_{20}^2L} & \frac{2 \left[\frac{h_{30} - h_{10}}{L} - \frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_g L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L}}{Bh_{20}^2} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Ακολούθως υπολογίζονται οι πίνακες L_1 και L_2 από την σχέση (4.9):

$$L_1 = [\Delta_1 \quad A_c \Delta_1 \quad A_c^2 \Delta_1 \quad A_c^3 \Delta_1 \quad A_c^4 \Delta_1 \quad A_c^5 \Delta_1] \quad (4.30)$$

$$L_2 = [\Delta_2 \quad A_c \Delta_2 \quad A_c^2 \Delta_2 \quad A_c^3 \Delta_2 \quad A_c^4 \Delta_2 \quad A_c^5 \Delta_2] \quad (4.31)$$

όπου:

$$A_c \Delta_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \tilde{a}_{11} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$A_c^2 \Delta_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tilde{a}_{12}}{B^2 h_{20}^5} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$$A_c^3 \Delta_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tilde{a}_{13}}{B^3 h_{20}^7} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$A_c^4 \Delta_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tilde{a}_{14}}{B^4 h_{20}^9} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$A_c^5 \Delta_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tilde{a}_{15}}{B^5 h_{20}^{11}} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

όπου

$$\bar{a}_{11} = \frac{\left(2 \left[\frac{h_{30} - h_{10}}{L} - \frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) Q_{20} + \frac{h_{20}(Q_{20}^2 - B^2 gh_{20}^3)}{L}}{Bh_{20}^3} \quad (4.37)$$

$$\bar{a}_{12} = \left(\frac{h_{20}(-B^2 gh_{20}^3 + Q_{20}^2)}{L} + Q_{20} \left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} + \frac{h_{30} - h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) \right) \left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} k^2} + \frac{h_{30} - h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) \quad (4.38)$$

$$\bar{a}_{13} = \left(\left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} + \frac{h_{30} - h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) Q_{20} + \frac{h_{20}(-B^2 gh_{20}^3 + Q_{20}^2)}{L} \right) \left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} k^2} + \frac{h_{30} - h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right)^2 \quad (4.39)$$

$$\tilde{a}_{14} = \left(\left(\left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} + \frac{h_{30}-h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(-B^2 gh_{20}^3 + Q_{20}^2)}{L} \right) \right. \\ \left. \left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{4/3} k^2} + \frac{h_{30}-h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) \right)^3 \quad (4.40)$$

$$\tilde{a}_{15} = \left(\frac{h_{20}(-B^2 gh_{20}^3 + Q_{20}^2)}{L} + Q_{20} \left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} + \frac{h_{30}-h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) \right) \\ \left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{4/3} k^2} + \frac{h_{30}-h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right)^4 \quad (4.41)$$

$$A_c \Delta_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \tilde{a}_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

$$A_c^2 \Delta_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\tilde{a}_{22}}{B^2 h_{20}^5} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

$$A_c^3 \Delta_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\tilde{a}_{23}}{B^3 h_{20}^7} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

$$A_c^4 \Delta_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\tilde{a}_{24}}{B^4 h_{20}^9} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

$$A_c^5 \Delta_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\tilde{a}_{25}}{B^5 h_{20}^{11}} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

όπου:

$$\tilde{a}_{21} = \frac{\left(2 \left[\frac{h_{30} - h_{10}}{L} - \frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) Q_{20} + \frac{h_{20} (Q_{20}^2 - B^2 gh_{20}^3)}{L}}{Bh_{20}^3} \quad (4.47)$$

$$\tilde{a}_{22} = \left(\left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} + \frac{h_{30} - h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) Q_{20} + \frac{h_{20} (-B^2 gh_{20}^3 + Q_{20}^2)}{L} \right) \left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} k^2} + \frac{h_{30} - h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) \quad (4.48)$$

$$\tilde{a}_{23} = \left(\frac{h_{20} (-B^2 gh_{20}^3 + Q_{20}^2)}{L} + Q_{20} \left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} + \frac{h_{30} - h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right) \right) \left(2 \left[-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B + 2h_{20}} \right)^{4/3} k^2} + \frac{h_{30} - h_{10}}{L} \right] Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right)^2 \quad (4.49)$$

$$\tilde{a}_{24} = \left(\frac{h_{20}(-B^2gh_{20}^3 + Q_{20}^2)}{L} + Q_{20} \left[2 \left(-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} + \frac{h_{30}-h_{10}}{L} \right) Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right] \right. \\ \left. \left(2 \left(-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{4/3} k^2} + \frac{h_{30}-h_{10}}{L} \right) Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right)^3 \right) \quad (4.50)$$

$$\tilde{a}_{25} = \left(\frac{h_{20}(-B^2gh_{20}^3 + Q_{20}^2)}{L} + Q_{20} \left[2 \left(-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{4/3} K^2} + \frac{h_{30}-h_{10}}{L} \right) Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right] \right. \\ \left. \left(2 \left(-\frac{gh_{20}}{\left(\frac{Bh_{20}}{B+2h_{20}} \right)^{4/3} k^2} + \frac{h_{30}-h_{10}}{L} \right) Q_{20} + \frac{h_{20}(k_q L q_0 + 2u_{10} - 2u_{20})}{L} \right)^4 \right) \quad (4.51)$$

Ακολουθώς ορίζουμε τον πίνακα $\Phi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$

όπου

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

και όπου ϕ_{ij} υπολογίζονται από την λύση της εξίσωσης (4.13). Τα λ_{ij} είναι οι αυθαίρετοι παράμετροι όπου θα χρησιμοποιήσουμε για την ευστάθεια του συστήματος κλειστού βρόχου.

$$\phi_{11} = \lambda_{11} \quad (4.53)$$

$$\phi_{12} = 0 \quad (4.54)$$

$$\phi_{13} = \frac{4}{BL} \quad (4.55)$$

$$\phi_{21} = 0 \quad (4.56)$$

$$\phi_{22} = \lambda_{22} \quad (4.57)$$

$$\phi_{23} = -\frac{4}{BL} \quad (4.58)$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον ελεγκτή ο οποίος έχει την παρακάτω μορφή:

$$F = G\Phi = \begin{bmatrix} \frac{3B\lambda_{11}L}{8} & \frac{B\lambda_{22}L}{8} & 1 \\ -\frac{B\lambda_{11}L}{8} & -\frac{3B\lambda_{22}L}{8} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

5.4 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Εφαρμόζοντας τον νόμο ελέγχου (4.3) όπου οι πίνακες F και G δίνονται από τις σχέσεις (4.59) και (4.28) προκύπτει ο πίνακας συνάρτησης μεταφοράς του αποσυζευγμένου συστήματος κλειστού βρόχου ως εξής:

$$H_{closed}(s) = \begin{bmatrix} h_{11}(s) & 0 \\ 0 & h_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

όπου:

$$h_{11}(s) = \frac{p_{1,0}^{-1}}{s - \lambda_{11}} \quad (4.61)$$

και

$$h_{22}(s) = \frac{p_{2,0}^{-1}}{s - \lambda_{22}} \quad (4.62)$$

5.5 Ευστάθεια συστήματος κλειστού βρόχου

Επιλέγοντας $\lambda_{11} = \lambda_{22} = -1$ και $p_{1,0} = p_{2,0} = 1$ το σύστημα κλειστού βρόχου που προκύπτει έχει την ακόλουθη μορφή:

$$H_{closed}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{s+1} \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

Το οποίο είναι ευσταθές αφού η πόλοι του συστήματος είναι στο -1

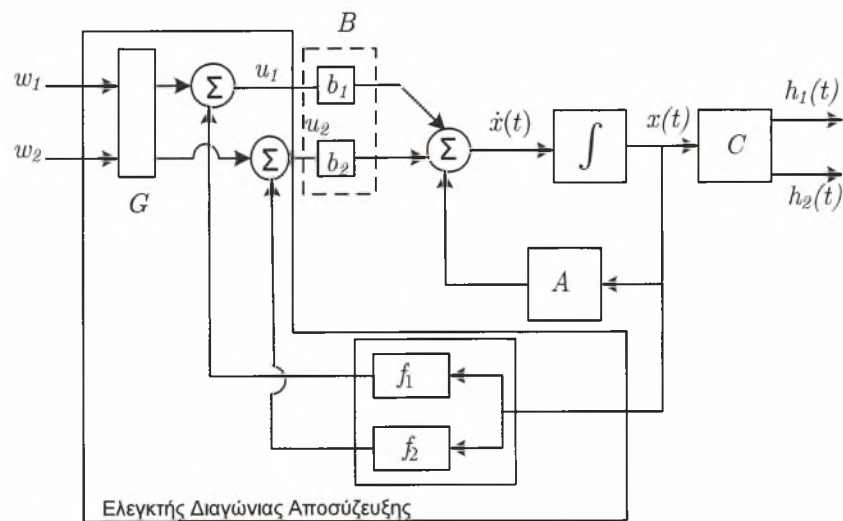
5.6 Προσομοίωση του αποσυζευγμένου συστήματος

Το σύστημα κλειστού βρόχου που προκύπτει εφαρμόζοντας στο σύστημα (4.1) νόμο ελέγχου $u = Fx + Gw$ για την διαγώνια αποσύζευξη εισόδων-εξόδων, δίνεται από τις εξισώσεις :

$$\dot{x}(t) = (A + BF)x(t) + Bw(t) \tag{4.64}$$

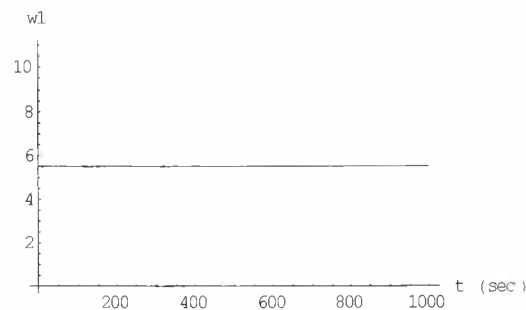
$$y(t) = Cx(t) \tag{4.65}$$

Το block διάγραμμα του συστήματος κλειστού βρόχου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα

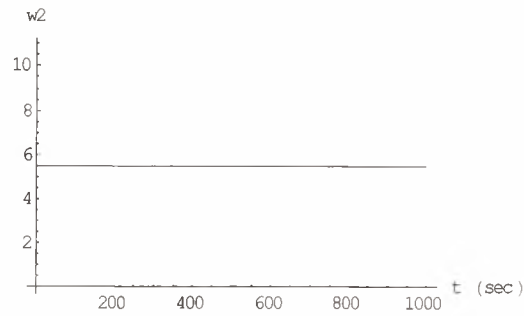


Σχήμα 62: Σύστημα κλειστού βρόχου

Το σύστημα κλειστού βρόχου διεγείρεται με εντολή εισόδου $w(t) = \begin{bmatrix} w_1(t) & w_2(t) \end{bmatrix}^T$ όπου $w_1(t)$ και $w_2(t)$ είναι μία συνάρτηση η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



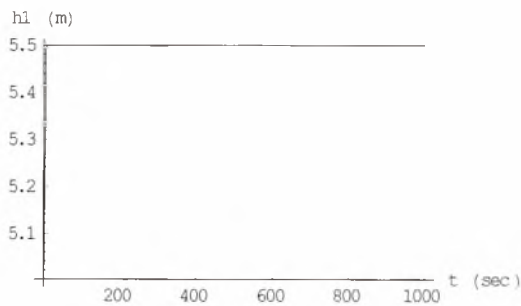
Σχήμα 63: Μεταβλητή ελέγχου 1



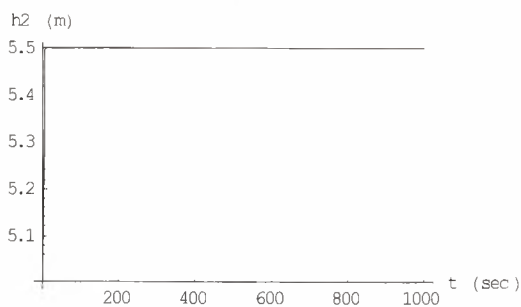
Σχήμα 64: Μεταβλητή ελέγχου 2

5.7 Απόκριση του αποσυζευγμένου γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου

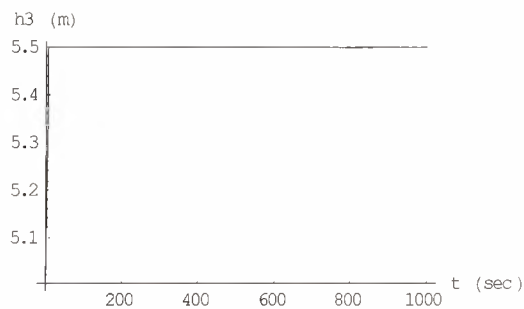
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα:



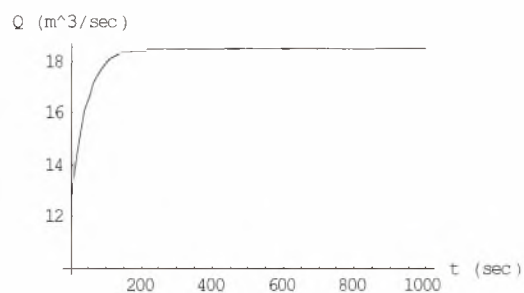
Σχήμα 65: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 66: Στάθμη ύδατος στο μέσο του καναλιού



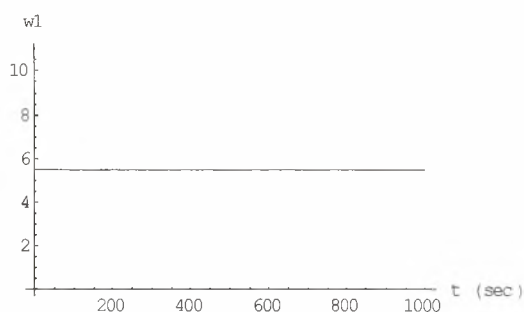
Σχήμα 67: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού



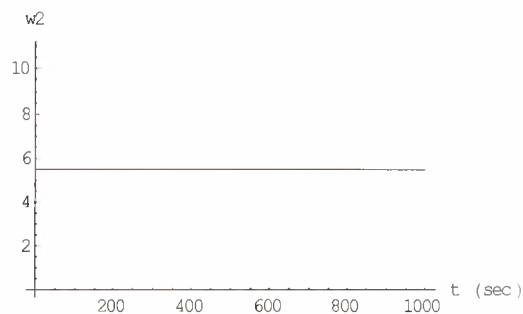
Σχήμα 68: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

5.8 Απόκριση του αποσυζευγμένου μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου

Το μη γραμμικό σύστημα κλειστού βρόχου (σχέσεις (1.6)) διεγείρεται με εντολή εισόδου $w(t) = [w_1(t) \ w_2(t)]^T$ όπου $w_1(t)$ και $w_2(t)$ είναι μία συνάρτηση η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

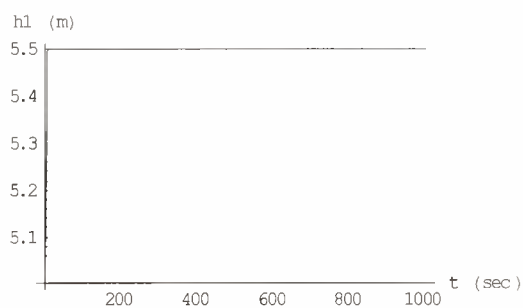


Σχήμα 69: Μεταβλητή ελέγχου 1

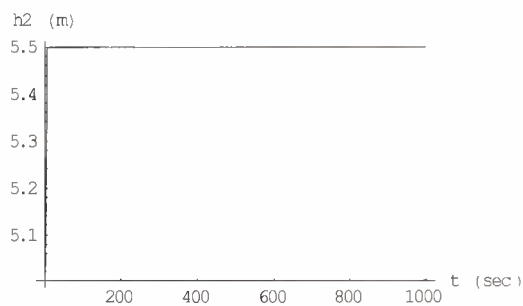


Σχήμα 70: Μεταβλητή ελέγχου 2

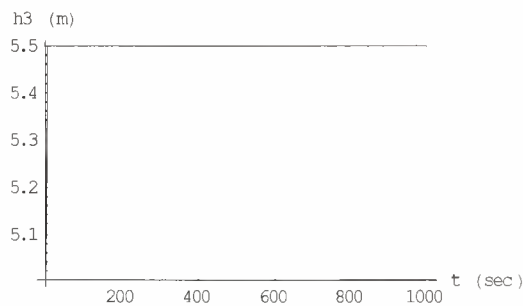
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα:



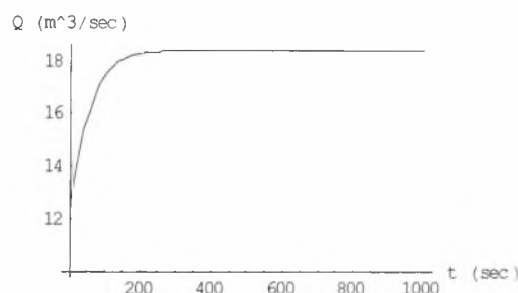
Σχήμα 71: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 72: Στάθμη ύδατος στο μέσο του καναλιού



Σχήμα 73: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού



Σχήμα 74: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

Από τις παραπάνω αποκρίσεις των καταστάσεων του συστήματος άρδευσης γίνεται κατανοητό ότι οι καταστάσεις h_1 και h_2 είναι πλέον αποσυζευγμένες κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι μπορούμε να ελέγξουμε την στάθμη του ύδατος στην είσοδο και την έξοδο του καναλιού χωρίς η μία στάθμη να ενεργεί στην άλλη. Επίσης η προσέγγιση του γραμμικού από το μη γραμμικό μοντέλο είναι ικανοποιητική καθώς παρατηρείται ότι οι αποκρίσεις των δύο συστημάτων (γραμμικού και μη γραμμικού) ανοικτού βρόχου ταυτίζονται.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

-
- [1] P.N. Paraskevopoulos and F.N. Koumboulis, "A New Approach to the Decoupling Problem of Linear Time-invariant Systems ", *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 329, pp.347-369, 1992.
 - [2] Μ. Γ. Σκαρπέτης , "Έλεγχος Γραμμικών Συστημάτων με Δομημένες Αβεβαιότητες" , Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1998.
 - [3] Ackermann, J., (1994), "Robust decoupling, ideal dynamics and yaw stabilization of 4WS cars", *Automatica.*, 30, pp.1761-1768.
 - [4] Ackermann, J., (1994), "Robust car steering by yaw rate control", In *Proc. IEEE Conf. Decision Contr.*, Honolulu, HI, Dec., pp. 2033-2034.
 - [5] F. N. Koumboulis and M.G.Skarpetis, "Automatic steering control of unmanned vehicles, **System and Control: Theory and Applications**, *Electrical and Computer Eng. Series, World Scientific and Eng. Society Press*, pp. 180-182, 2000.
 - [6] M.G.Skarpetis and F. N. Koumboulis, "Multi-Objective robust control for 4WS cars", **System and Control: Theory and Applications**, *Electrical and Computer Eng. Series, World Scientific and Eng. Society Press*, pp. 169-171, 2000.
 - [7] F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Robust control of cars with front and rear wheel steering", *IEE Proceedings – Control Theory and Applications*, Vol. 149, pp. 394-404, 2002
-

6.0 Επιλογή των παραμέτρων των ελεγκτών προσεγγιστικής εντολής μέσου αλγορίθμου σύγκρισης των ριζών

Σ την ενότητα αυτή θα υπολογιστούν οι παράμετροι των ελεγκτών που προσδιορίστηκαν στα κεφάλαια 3.0 και 4.0 μέσου ενός αλγορίθμου σύγκρισης των ριζών.

6.1 Αλγόριθμος εύρεσης των τιμών του ελεγκτή

Ο αλγόριθμος που βρίσκει τις βέλτιστες παραμέτρους του ελεγκτή, έτσι ώστε οι ρίζες του χαρακτηριστικού πολυωνύμου του συστήματος κλειστού βρόχου να βρίσκονται όσο τον δυνατών αριστερότερα στο αρνητικό μιγαδικό ημιεπίπεδο έχει την ακόλουθη μορφή:

Βήμα 1: Δώσε τιμή στο r και στο n .

Βήμα 2: Επιλογή μίας περιοχής για της παραμέτρους του ελεγκτή, για την οποία το σύστημα κλειστού βρόχου είναι ευσταθές. Η περιοχή των παραμέτρων του ελεγκτή δίνεται από τις σχέσεις

$$f_{1,i \min} \leq f_{1,i} \leq f_{1,i \max}, \text{ όπου } i = 1, 2, \dots, r \text{ και } f_{2,i_2 \min} \leq f_{2,i_2} \leq f_{2,i_2 \max}, \text{ όπου } i_2 = 1, 2, \dots, n.$$

Βήμα 3: Επιλογή τιμών των παραμέτρων του ελεγκτή $f_{1,i \min}$ και $f_{2,i_2 \min}$.

Βήμα 4: Θέσε $i_3 = 0$

Βήμα 5: Αύξησε τις τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή σύμφωνα με τις σχέσεις

$$f_{1,i} = f_{1,i \min} + i_3 \text{ και } f_{2,i_2} = f_{2,i_2 \min} + i_3, \text{ για κάθε } f_{2,i_2 \min} \neq 0.$$

$$f_{2,i_2 \min} = f_{2,i_2 \max} = 0 \text{ τότε } f_{2,i_2} = f_{2,i_2 \min} = f_{2,i_2 \max} = 0 \forall i_3$$

Βήμα 6: Υπολογισμός των ριζών του χαρακτηριστικού πολυωνύμου για τις επιλεγμένες τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή $\rho_{i,i_3} = a_{i,i_3} + \beta_{i,i_3} j$, όπου $i = 1, 2, \dots, n$.

Βήμα 7: Αύξηση του $i_3 = i_3 + 1$ και γύρνα πάλι στα Βήματα 4 και 5, μέχρι το $i_3 = 10000$ και

$$f_{1,i} = f_{1,i \max}, f_{2,i_2} = f_{2,i_2 \max}$$

Βήμα 8: Σύγκρινε τις τιμές των ριζών σύμφωνα με τον τύπο

$$|a_{1,i_3} + a_{2,i_3} + \dots + a_{1,i_3}| > |a_{1,i_3+1} + a_{2,i_3+1} + \dots + a_{1,i_3+1}|.$$

Βήμα 9: Εάν ισχύει $\left| a_{1,i_3} + a_{2,i_3} + \dots + a_{1,i_3} \right| > \left| a_{1,i_3+1} + a_{2,i_3+1} + \dots + a_{1,i_3+1} \right|$ τότε

$$f_{1,i} = f_{1,i \min} + 0.9i_3 \quad \text{και} \quad f_{2,i_2} = f_{2,i_2 \min} + i_3, \quad \text{αλλιώς} \quad f_{1,i} = f_{1,i \min} + 0.9(i_3 + 1) \quad \text{και} \\ f_{2,i_2} = f_{2,i_2 \min} + (i_3 + 1).$$

Βήμα 10: Εξαγωγή παραμέτρων ελεγκτή.

6.2 Εφαρμογή του αλγορίθμου για την επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή του Κεφαλαίου 3.0

Στην παράγραφο θα γίνει εφαρμογή του αλγορίθμου της ενότητας 6.1 για την εύρεση των παραμέτρων του ελεγκτή του κεφαλαίου 3.0. Θέτοντας $r = 1$, $n = 3$ και επιλέγοντας περιοχές για τις παραμέτρους του ελεγκτή τις ακόλουθες $f_{1.1 \min} = -\frac{61}{10}$, $f_{2.1 \min} = 0$, $f_{2.2 \min} = 6$, $f_{2.3 \max} = 0$, $f_{2.1 \min} = f_{2.3 \max} = 0$, $f_{1.1 \max} = \frac{3999}{14000}$ και $f_{2.2 \max} = 1000$ ο αλγόριθμος δίνει τις ακόλουθες τιμές για τις παραμέτρους του ελεγκτή $f_{1.1} = -\frac{24001}{14000}$ και $f_{2.2} = \frac{12}{7}$

6.2.1 Προσομοίωση γραμμικού συστήματος.

Εφαρμόζοντας στον νόμο ελέγχου της σχέσης (2.93) στο σύστημα της σχέσης (1.38) προκύπτει το παρακάτω σύστημα κλειστού βρόχου:

$$\Delta \dot{x}(t) = (A(q) + B(q)K_2)\Delta x(t) + B(q)K_1 \int_0^t e(\tau) d\tau + D * q \quad (5.1)$$

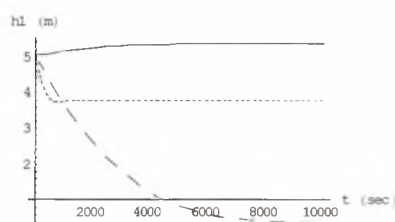
$$y(t) = C(q)\Delta x(t) \quad (5.2)$$

Ακόμη για την προσομοίωση του συστήματος, χρησιμοποιούνται για τις παραμέτρους του συστήματος, οι τιμές του πίνακα 1, ενώ η τιμή της αβεβαιότητας του συστήματος μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών $q_1 \in [q_1^- \quad q_1^+]$ και $q_2 \in [q_2^- \quad q_2^+]$, όπου $q_1^- = 1[m]$, $q_1^+ = 4[m]$, $q_2^- = 1000[m]$ και $q_2^+ = 10000[m]$, όπου $K_1 = f_{1.1}$, $K_2 = f_{2.2}$.

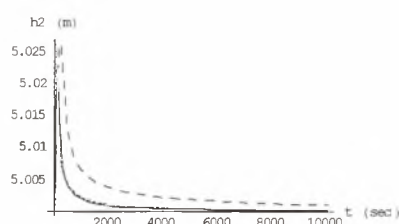
Το Block διάγραμμα του κλειστού συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 23. Το σύστημα κλειστού βρόχου διεγείρεται με τις εισόδους των σχημάτων 29 και 30.

Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η στικτή γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων

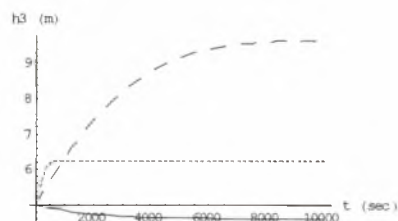
$\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



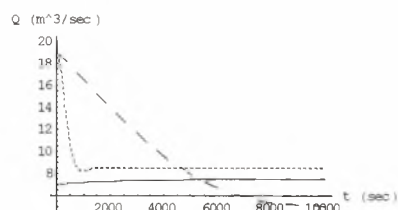
Σχήμα 75: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 76: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού



Σχήμα 77: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού

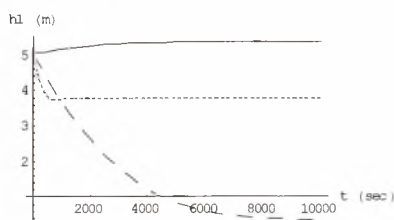


Σχήμα 78: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

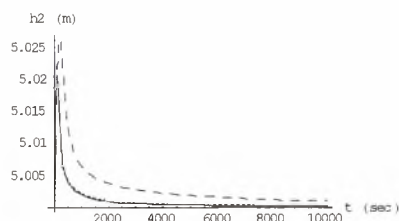
6.2.2 Προσομοίωση μη γραμμικού συστήματος.

Σ την ενότητα αυτή θα γίνει η προσομοίωση του μη γραμμικού συστήματος χρησιμοποιώντας τον γραμμικό νόμο ελέγχου που υπολογίσαμε για το γραμμικό σύστημα (σχέση (2.93)).

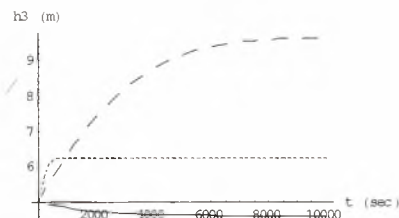
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η στικτή γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



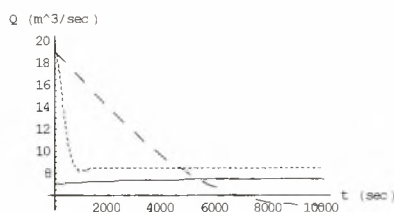
Σχήμα 79: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 80: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού



Σχήμα 81: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού



Σχήμα 82: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

6.3 Εφαρμογή του αλγορίθμου για την επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή του Κεφαλαίου 4.0

Στην παράγραφο θα γίνει εφαρμογή του αλγορίθμου της ενότητας 6.1 για την εύρεση των παραμέτρων του ελεγκτή του κεφαλαίου 3.0. Θέτοντας $r = 2$, $n = 3$ και επιλέγοντας περιοχές για τις παραμέτρους του ελεγκτή τις ακόλουθες $f_{1,1\min} = -202001$, $f_{1,2\min} = -201001$, $f_{2,1\min} = -101001$, $f_{2,2\min} = f_{2,2\max} = 0$, $f_{2,3\min} = f_{2,3\max} = 0$, $f_{1,1\max} = -1.00005 \times 10^8$, $f_{1,2\max} = -1 \times 10^8$ και $f_{2,1\max} = -5 \times 10^7$ ο αλγόριθμος δίνει τις ακόλουθες τιμές για τις παραμέτρους του ελεγκτή $f_{1,1} = -1.00005 \times 10^8$, $f_{1,2} = -1 \times 10^8$ και $f_{2,1} = -5 \times 10^7$

6.3.1 Προσομοίωση γραμμικού συστήματος.

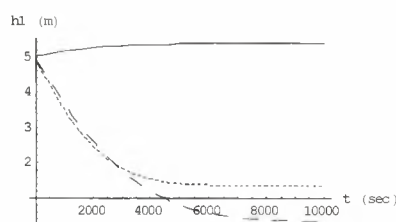
Εφαρμόζοντας στον νόμο ελέγχου της σχέσης (3.44) στο σύστημα της σχέσης (1.38) προκύπτει το παρακάτω σύστημα κλειστού βρόχου:

$$\Delta \dot{x}(t) = (A(q) + B(q)K_3)\Delta x(t) + B(q)K_1 \int_0^t e(\tau) d\tau + B(q)K_2 \int_0^t e(\tau) d\tau + D * q \quad (5.3)$$

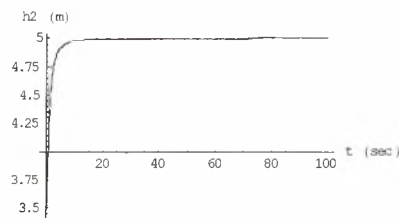
$$y(t) = C(q)\Delta x(t) \quad (5.4)$$

Ακόμη για την προσομοίωση του συστήματος, χρησιμοποιούνται για τις παραμέτρους του συστήματος, οι τιμές του πίνακα 1, ενώ η τιμή της αβεβαιότητας του συστήματος μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών $q_1 \in [q_1^-, q_1^+]$ και $q_2 \in [q_2^-, q_2^+]$, όπου $q_1^- = 1[m]$, $q_1^+ = 4[m]$, $q_2^- = 1000[m]$ και $q_2^+ = 10000[m]$. Οι παράμετροι του ελεγκτή θέτονται με βάση τον αλγόριθμο της προηγούμενης ενότητας.

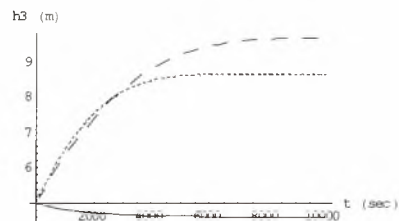
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η σπικτή γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



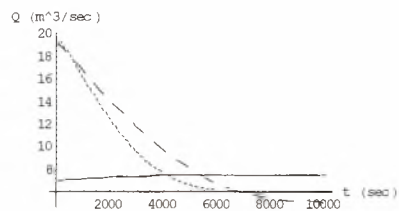
Σχήμα 83: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 84: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού



Σχήμα 85: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού

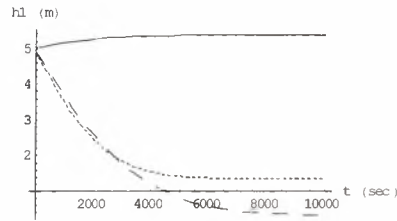


Σχήμα 86: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

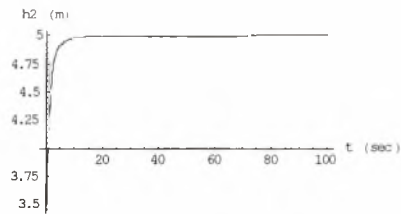
6.3.2 Προσομοίωση μη γραμμικού συστήματος.

Σ την ενότητα αυτή θα γίνει η προσομοίωση του μη γραμμικού συστήματος χρησιμοποιώντας τον γραμμικό νόμο ελέγχου που υπολογίσαμε για το γραμμικό σύστημα (σχέση (3.44)).

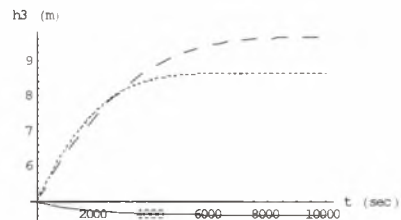
Η απόκριση του διανύσματος κατάστασης του μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου, για τις διάφορες τιμές των αβεβαιοτήτων (η στική γραμμή είναι για τις ελάχιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 1000, q_2 = 1\}$, η συμπαγής γραμμή είναι για τις μεσαίες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 5000, q_2 = 2\}$ και η γραμμή που αποτελείται από παύλες είναι για τις μέγιστες τιμές των αβεβαιοτήτων $\{q_1 = 10000, q_2 = 4\}$), παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



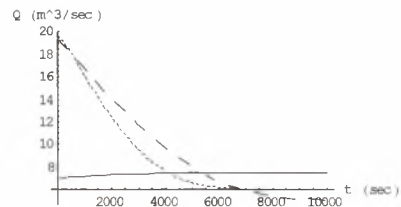
Σχήμα 87: Στάθμη ύδατος στην είσοδο του καναλιού



Σχήμα 88: Στάθμη ύδατος στο κέντρο του καναλιού



Σχήμα 89: Στάθμη ύδατος στην έξοδο του καναλιού



Σχήμα 90: Μεταβολή της ροής στο εσωτερικό του καναλιού

Από τα αποτελέσματα τις εφαρμογής των παραμέτρων του ελεγκτή, που προέκυψαν από τον αλγόριθμο της ενότητας 6.1 παρατηρείται ότι το σύστημα κλειστού βρόχου προσεγγίζει πιο γρήγορα την μόνιμη κατάσταση, πράγμα που σημαίνει ότι οι ρίζες του συστήματος κλειστού βρόχου βρίσκονται πιο αριστερά στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο, απ' ότι αυτές των συστημάτων κλειστού βρόχου των κεφαλαίων 3.0 και 4.0. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τους ελεγκτές των κεφαλαίων 3.0 και 4.0

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- [1] V. Gopal, L.T. Biegler, "Large scale inequality constrained optimization and control", IEEE Control Systems Magazine, vol. 18, pp. 59-68, 1998.

- [2] K. Schittkowski, "NLQPL: A FORTRAN-Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems," *Annals of Operations Research*, vol. 5, pp. 485-500, 1985.
- [3] C. Blum, A. Roli, "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison", *ACM Computing Surveys*, vol 35, pp. 268–308, 2003.
- [4] F.W. Glover, G.A. Kochenberger (Eds.), *Handbook of Metaheuristics*, in Series: Int. Series in Operations Research&Management Science, vol. 57, 2003, Springer.
- [5] N. Azizi, S. Zolfaghari, "Adaptive temperature control for simulated annealing: a comparative study", *Comp. & Operations Research*, vol. 31, pp. 2439-2451, 2004.
- [6] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt Jr., M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, vol. 220, pp. 671- 680, 1983.
- [7] H. Martínez-Alfaro, S. Gómez-García, "Mobile robot path planning and tracking using simulated annealing and fuzzy logic control", *Expert Systems with Applications*, vol. 15, pp. 421-429, 1998.
- [8] M. Hanke, P. Li, "Simulated annealing for the optimization of batch distillation processes", *Computers & Chemical Engineering*, vol. 24, pp. 1-8, 2000.
- [9] E.W. McGookin, D.J. Murray-Smith, "Submarine manoeuvring controllers' optimisation using simulated annealing and genetic algorithms", *Control Engineering Practice*, vol. 14, pp. 1-15, 2006.
- [10] Y.-Z. Luo, G.-J. Tang, "Spacecraft optimal rendezvous controller design using simulated annealing", *Aerospace Science and Technology*, vol. 9, pp. 732-737, 2005.
- [11] R. Faber, T. Jockenhövel, G. Tsatsaronis, "Dynamic optimization with simulated annealing", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 29, pp. 273-290, 2005.
- [12] K.L. Musser, J.S. Dhingra, G.L. Blankenship, "Optimization based job shop scheduling," *IEEE Trans. On Automatic Control*, vol. 38, pp. 808 –813, 1993.
- [13] S. Chen, J. Wu, R.H. Istepanian, J. Chu, "Optimizing stability bounds of finite-precision PID controller structures," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 44, pp. 2149 –2153, 1999.
- [14] M.P. Tzamtzi, F.N. Koumboulis, N.D. Kouvakas, G.E. Panagiotakis, "A Simulated Annealing Controller for Sloshing Suppression in Liquid Transfer", *14th Mediterranean Conf. on Control and Autom.*, Italy, 2006.
- [15] N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, E. Teller, "Equation of state calculation using fast computing machines", *J. of Chemical Physics*, vol. 21, pp. 1087-1092, 1953.
- [16] F. Nejjari, G. Roux, B. Dahhou and A. Benhammou, "Estimation and optimal control design of a biological wastewater treatment plant", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 48, pp. 269-280, 1999.

Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζονται τεχνικές ελέγχου για τον έλεγχο της στάθμης σε κανάλια άρδευσης. Αρχικά δημιουργήθηκαν οι εξισώσεις που περιγράφουν το μη γραμμικό σύστημα. Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τεχνικές γραμμικοποίησης γραμμικοποιήθηκε το μη γραμμικό σύστημα, και δημιουργήθηκε το γραμμικό σύστημα με περιγραφή στο χώρο κατάστασης. Στην συνέχεια έγινε προσομοίωση του συστήματος ανοικτού βρόχου, γραμμικού και μη γραμμικού, και διαπιστώθηκε ότι το σύστημα είναι ασταθές. Συνεπώς παρουσιάστηκε η ανάγκη σχεδίασης ελεγκτή για την ευσταθιοποίηση του συστήματος κλειστού βρόχου. Επιπλέον σχεδιαστικός στόχος ορίστηκε η σταθερή διατήρηση της στάθμης στο κέντρο του καναλιού. Τέλος δημιουργήθηκε ανάγκη σχεδίασης εύρωστου ελεγκτή που θα ευσταθοιοποιεί το σύστημα για κάθε τιμή των αβέβαιων παραμέτρων, που ορίστηκαν να είναι το μήκος και το πλάτος του καναλιού. Η ανάγκη για εύρωστη ευσταθιοποίηση προέκυψε διότι το μήκος και πλάτος ποικίλοι ανάλογα με το κανάλι, και θα πρέπει οι ελεγκτές ευσταθιοποίησης να ευσταθοιοποιούν το σύστημα σε όλο το πεδίων τιμών των αβέβαιων παραμέτρων. Τέλος δημιουργήθηκε και ελεγκτής αποσύζευξης των εισόδων και των εξόδων του συστήματος του καναλιού.

Στην συνέχεια θέλοντας να επιτευχθεί η σχεδιαστική απαίτηση της ακολούθησης εντολής από την δεύτερη κατάσταση του συστήματος (στάθμη στο κέντρο του καναλιού), δημιουργήθηκε ένας ελεγκτής προσεγγιστικής ακολούθησης του διανύσματος κατάστασης. Για την δημιουργία του ελεγκτή που θα το επιτυγχάνει αυτό, δημιουργήθηκαν αρχικά οι επαυξημένοι πίνακες του συστήματος και αφού το επαυξημένο σύστημα είναι ελέγξιμο, συνεχίστηκε οι σχεδίαση του νόμο ελέγχου, που θα επιτυγχάνει τον σχεδιαστικό στόχο. Αρχικά δημιουργήθηκε ένας ελεγκτής τοποθέτησης πόλων, για το επαυξημένο σύστημα, που θα τοποθετεί τους πόλους του συστήματος σε επιθυμητές τιμές. Στην συνέχεια κατασκευάστηκε ο νόμος ελέγχου που θα επιτυγχάνει τους σχεδιαστικούς στόχους. Ο νόμος ελέγχου που κατασκευάστηκε αποτελείται από δύο μέρη, το πρώτο μέρος είναι η ανατροφοδότηση του διανύσματος κατάστασης πολλαπλασιασμένο με ένα διάνυσμα K_2 (το διάνυσμα K_2 προκύπτει από τον ελεγκτή τοποθέτησης πόλων του επαυξημένου συστήματος), ενώ το δεύτερο μέρος ολοκληρώνει το σφάλμα πολλαπλασιασμένο με ένα κέρδος K_1 . Στην συνέχεια εφαρμόστηκε ο νόμος ελέγχου στο ανοικτό σύστημα και έγινε η προσομοίωση του συστήματος κλειστού βρόχου. Από την προσομοίωση του συστήματος κλειστού βρόχου παρατηρήθηκε πως ο νόμος ελέγχου που δημιουργήθηκε επιτυγχάνει τους σχεδιαστικούς στόχους που τέθηκαν, αφού η δεύτερη κατάσταση (στάθμη στο κέντρο του καναλιού) του συστήματος ακολουθεί πλήρως την εξωτερική εντολή έχοντας επίσης μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση. Εν συνεχεία εφαρμόστηκε ο γραμμικός νόμος ελέγχου στο ανοικτό μη γραμμικό σύστημα και έγινε η προσομοίωση του μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου. Από την προσομοίωση του μη γραμμικού συστήματος παρατηρήθηκε πως ο γραμμικός ελεγκτής επιτυγχάνει τις σχεδιαστικές απαιτήσεις και στο μη

γραμμικό σύστημα, που είναι η ακολούθηση του διανύσματος κατάστασης και το μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση του συστήματος.

Στην συνέχεια θέλοντας να επιτευχθεί η σχεδιαστική απαίτηση της ακολούθησης εντολής από την δεύτερη κατάσταση του συστήματος (στάθμη στο κέντρο του καναλιού) καθώς επίσης και οι εξασθένηση των διαταραχών (ροή εξόδου καναλιού και διήθηση), δημιουργήθηκε ένας ελεγκτής προσεγγιστικής ακολούθησης του διανύσματος κατάστασης. Για την δημιουργία του ελεγκτή που θα το επιτυγχάνει αυτό, δημιουργήθηκαν αρχικά οι επαυξημένοι πίνακες του συστήματος και αφού το επαυξημένο σύστημα είναι ελέγξιμο, συνεχίστηκε οι σχεδίαση του νόμο ελέγχου, που θα επιτυγχάνει τον σχεδιαστικό στόχο. Αρχικά δημιουργήθηκε ένας ελεγκτής τοποθέτησης πόλων, για το επαυξημένο σύστημα, που θα τοποθετεί τους πόλους του συστήματος σε επιθυμητές τιμές. Στην συνέχεια κατασκευάστηκε ο νόμος ελέγχου που θα επιτυγχάνει τους σχεδιαστικούς στόχους. Ο νόμος ελέγχου που κατασκευάστηκε αποτελείται από τρία μέρη, το πρώτο μέρος είναι η ανατροφοδότηση του διανύσματος κατάστασης πολλαπλασιασμένο με ένα διάνυσμα K_3 (το διάνυσμα K_3 προκύπτει από τον ελεγκτή τοποθέτησης πόλων του επαυξημένου συστήματος), το δεύτερο μέρος ολοκληρώνει δύο φορές το σφάλμα πολλαπλασιασμένο με ένα κέρδος K_1 και το τρίτο μέρος ολοκληρώνει μία φορά το σφάλμα πολλαπλασιασμένο με ένα κέρδος K_2 . Στην συνέχεια εφαρμόστηκε ο νόμος ελέγχου στο ανοικτό σύστημα και έγινε η προσομοίωση του συστήματος κλειστού βρόχου. Από την προσομοίωση του συστήματος κλειστού βρόχου παρατηρήθηκε πως ο νόμος ελέγχου που δημιουργήθηκε επιτυγχάνει τους σχεδιαστικούς στόχους που τέθηκαν, αφού η δεύτερη κατάσταση (στάθμη στο κέντρο του καναλιού) του συστήματος ακολουθεί πλήρως την εξωτερική εντολή έχοντας επίσης μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση και η επίδραση των διαταραχών είναι μηδενική. Εν συνεχεία εφαρμόστηκε ο γραμμικός νόμος ελέγχου στο ανοικτό μη γραμμικό σύστημα και έγινε η προσομοίωση του μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου. Από την προσομοίωση του μη γραμμικού συστήματος παρατηρήθηκε πως ο γραμμικός ελεγκτής επιτυγχάνει τις σχεδιαστικές απαιτήσεις και στο μη γραμμικό σύστημα, που είναι η ακολούθηση του διανύσματος κατάστασης, το μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση του συστήματος και η εξασθένηση των διαταραχών.

Σε μία προσπάθεια βελτίωσης της απόκρισης του συστήματος αποφασίστηκε η σχεδίαση ελεγκτή διαγώνιας αποσύζευξης μεταξύ των εισόδων του συστήματος και των καταστάσεων του καναλιού. Έτσι ώστε, η στάθμη στην είσοδο του καναλιού, να εξαρτάται αποκλειστικά από την πρώτη εξωτερική είσοδο (ροή στην είσοδο του καναλιού) και η στάθμη στην έξοδο του καναλιού αποκλειστικά από τη δεύτερη εξωτερική είσοδο (ροή στην είσοδο του καναλιού), καθώς επίσης και η σταθερή διατήρηση του ύψους στο κέντρο του καναλιού. Αφού αποδείχθηκε ότι το σύστημα είναι διαγωνίως αποσυζεύξιμο, σχεδιάστηκε ελεγκτής για τη διαγώνια αποσύζευξη εισόδων-εξόδων για τις μεταβλητές κατάστασης που περιγράψαμε παραπάνω. Ταυτόχρονα ο ελεγκτής σχεδιάστηκε έτσι ώστε να τοποθετεί τους πόλους των δύο αποσυζευγμένων υποσυστημάτων σε συγκεκριμένες επιθυμητές θέσεις. Με εφαρμογή του ελεγκτή στο σύστημα ανοικτού βρόχου, έγινε προσομοίωση του κλειστού συστήματος και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματά της. Για την υλοποίηση του ελεγκτή απαιτείται η ανατροφοδότηση όλων των καταστάσεων

του συστήματος. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαπιστώνεται ότι η σχεδιαστικές απαιτήσεις επιτυγχάνονται πλήρως.

Στην συνέχεια για να έχουμε μία πιο γρήγορη συμπεριφορά του συστήματος δημιουργήθηκε αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης (metahuristic), ο οποίος βρίσκει τις παραμέτρους των ελεγκτών του κεφαλαίου 3 και 4 έτσι ώστε η απόκριση του συστήματος να είναι η πιο βέλτιστη. Ο αλγόριθμος βρίσκει τις ρίζες του συστήματος κλειστού βρόχου για διάφορες τιμές της αβεβαιότητας και για διάφορες τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή και τις συγκρίνει μεταξύ τους. Από την σύγκριση των ριζών για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων επιλέγονται οι παράμετροι με οι οποίοι δίνουν ρίζες για τα συστήματα κλειστού βρόχου όσο τον δυνατόν αριστερότερα στο μιγαδικό ημιεπίπεδο. Από την σύγκριση των αποκρίσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων που δίνουν οι τιμές των παραμέτρων που βρέθηκαν με τον αλγόριθμο της προσομοιωμένης ανόπτησης παρατηρήθηκε ότι η απόκριση των συστημάτων είναι πραγματικά πιο γρήγορη σε σχέση με την τυχαία επιλογή των παραμέτρων που γινόταν στα κεφάλαια 3 και 4.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως ο εύρωστος νόμος ελέγχου με τον μετριασμό των διαταραχών, είναι εκείνα που μας επιτυγχάνουν όλους τους σχεδιαστικούς στόχους. Αυτό προκύπτει διότι με την εφαρμογή του παραπάνω ελέγχου στο εύρωστο ανοικτό σύστημα, τα συμπεράσματα που προκύπτουν για το κλειστό σύστημα, είναι για όλο το πεδίο τιμών των αβεβαιοτήτων και όχι για μία συγκεκριμένη τιμή. Πράγμα που σημαίνει πως η μελέτη αυτή συγκλίνει πιο πολύ στην πραγματική συμπεριφορά του καναλιού άρδευσης.

Βιβλιογραφία.

A. Βιβλία

-
- [A.1] Μ. Γ. Σκαρπέτης , “**Έλεγχος Γραμμικών Συστημάτων με Δομημένες Αβεβαιότητες**” , Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1998.
- [A.2] Π.Ν Παρασκευόπουλος, “**Εισαγωγή στον αυτόματο έλεγχο ,Τόμος Α: θεωρία**” , Αθήνα 2001.
- [A.3] Μ. G. Skarpetis, “**Aircraft Flight Control via Decoupling Techniques** “(Έλεγχος Πτήσης Αεροσκαφών με Τεχνικές Αποσύζευξης), Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Αθήνα 1991.
- [A.4] Φ. Ν. Κουμπουλής, Β. Γ. Μέρτζιος, “**Εισαγωγή στη ρομποτική**”, Αθήνα 2002
- [A.5] Φ. Ν. Κουμπουλής , “**Βιομηχανικός Έλεγχος**”, Αθήνα 1999
- [A.6] Φ. Ν. Κουμπουλής, Μ. Π. Τζαμτζή , “**Διδακτικές Σημειώσεις στον Έλεγχο Και Προγραμματισμό Ρομπότ** ”, Αθήνα 1999.
- [A.7] R.C Dorf R.H Bishop, “**Σύγχρονα συστήματα αυτομάτου ελέγχου**”, Α έκδοση, Τζιόλα 2003
- [A.8] Ackermann, J, A. Barlett, D. Kaesbauer, W. Sienel and R. Steinhauser (1993). Robust Control (system with uncertain physical parameters), Springer, London.
- [A.9] Μ. Γ. Σκαρπέτης “**Έλεγχος πτήσης αεροσκαφών με τεχνικές αποσύζευξης**“, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, 1991.

B. Εργασίες

-
- [B.1]. C. T. Chen, Linear System Theory and Design. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1984.
- [B.2]. M. J. Corless, G. Leitmann, and E. P. Ryan, “Tracking in the presence of bounded uncertainties,” presented at the 4th Int. Conf. Control Theory, Cambridge, U.K., Sept, 1984.

- [B.3]. K. Takaba, "Robust preview tracking control for polytopic uncertain systems", in Proc. 37th IEEE Conf. Decision Contr., Tampa, FL, 1998, pp. 1765-1770
- [B.4]. M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and N.S. Roussos, "Robust output command tracking for linear systems with non linear uncertain structure with application to flight control", in Proc. 44th IEEE Conf. Decision Contr., and Europ. Contr. Conf. Seville, Spain 2005, pp. 7502-7507.
- [B.5]. M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, "Robust Tracking and Disturbance Attenuation Controllers for Automatic Steering", will presented in the 14th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation June 28-30, 2006, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.
- [B.6]. F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Robust control of cars with front and rear wheel steering", IEE Proceedings – Control Theory and Applications, vol. 149, pp. 394-404, 2002.
- [B.7]. Ackerman J., Guldner j., Sienel W., Steinhouer R. and Utkin V.I.: "Linear and nonlinear controller design for robust automatic steering", IEEE Trans. On Control system Technology, 1995, 3, pp. 132-143.
- [B.8]. Ackermann, J., (1994), "Robust decoupling, ideal dynamics and yaw stabilization of 4WS cars", Automatica., 30, pp.1761-1768.
- [B.9]. Ackermann, J., and Sienel, W., (1993), "Robust yaw damping of cars with front and rear wheel steering", IEEE Trans. on Control System Technology, 1, pp.15-20.
- [B.10]. R.T.O'brein, P.A. Iglesias, "Time-varying steering control for an autonomous highway vehicle", Proc of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, June 1998, pp. 26-30.
- [B.11]. K Wei, B. and R. Barmish, "Making a polynomial Hurwitz invariant by choice of feedback gain", Int. J. Contr. Vol 50, pp 1025-1038, 1989.
- [B.12]. F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Input -Output decoupling for linear systems with non-linear uncertain structure", J. of the Franklin Institute, vol. 333(B), pp. 593-624, 1996.
- [B.13]. F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Robust Triangular Decoupling with Application to 4WS Cars", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 45, pp. 344-352, 2000.
- [B.14]. Akouz K., A. Benhammou, P.-O. Malaterre, B. Dahhou, G. Roux, "Predictive Control Applied to a Bench Mark", IEEE, SMC98, in press.
- [B.15]. ASCE, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, "Special issue on canal automation", Jan./Feb. 1998, Vol. 124, n°1, ISSN 0733-9437.
- [B.16]. Balogun O.S., M. Hubbard, J.J. DeVnes, "Automatic control of canal flow using linear quadratic regulator theory", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, n° 1, pp. 75-102.
- [B.17]. Barre de Saint-Venant A.J.C., "Theorie du mouvement non-permanent des eaux avec application aux crues des rivières et a l'introduction des mares dans leur lit", Acad. Sci. Paris, Comptes rendus V. 73, 1871, pp. 148-154, 237-240.

- [B.18]. Baume J.-P., J. Sau, "Modelling of irrigation channel dynamics for controller design", IEEE, SMC98, in press.
- [B.19]. Baume J.P., J. Sau, "Study of irrigation canal dynamics for control purpose", International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24, 1997, pp. 3-12.
- [B.20]. Bautista E., Clemmens A.J., "An open-loop control system for open-channel flows", ASCE Int. Water Resources Engineering Conference, Memphis, August 3-7, 1998, in press.
- [B.21]. Bouillot A.-P., "Application of the fuzzy set theory to the control of a large canal", ASCE - AFEID Meeting, October 1994, SCP, Aix-en-Provence, France, 25 p.
- [B.22]. Bounit H., H. Hammouri, J. Sau, "Regulation of an irrigation canal through the semigroup approach", International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24, 1997, pp. 261-267.
- [B.23]. Cardona J., J. Rodellar, M. Gomez, "A decentralized adaptive predictive controller for irrigation canals", International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24, 1997, pp. 215-219.
- [B.24]. Cemagref (Malaterre P.-O., Baume J.P.), LAAS (Pourciel J.B., Dahhou B., Aguilar J.), University of Marrakech (Benhammou A.), 1997, "Proceedings of the International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications", RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24, 1997.
- [B.25]. Cemagref, "SIC : theoretical concepts & user's guide", 1997, 70+ 121 p.
- [B.26]. Chevereau G., "Contribution a l'etude de la regulation dans les systemes hydrauliques a surface libre". These de Doctorat de l'Institut National Polytechnic de Grenoble, 1991.
- [B.27]. Coron J.-M., B. d'Andrea-Novell, G. Bastin, "A Lyapunov approach to control irrigation canals modeled by Saint-Venant's equations", to be submitted to ECC99.
- [B.28]. Corrigan G., A. Giua, G. Usai, "PETRI net modeling of irrigation canal networks", International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24, 1997, pp. 39-48
- [B.29]. Corrigan G., S. Sanna, G. Usai, "Sub-optimal constant-volume control for open channel networks", Appl. Math. Modelling, Vol. 7, 1983, pp. 262-267.
- [B.30]. Cunge J.A., F.M. Holly, A. Verwey, "Practical aspects of computational river hydraulics", Pitman Advanced Publishing Program, 1980.
- [B.31]. Deltour J.-L., "Application de l'automatique numerique a la regulation des canaux ; Proposition d'une methodologie d'etude", These de Doctorat, Institut National Polytechnic de Grenoble, 1992.
- [B.32]. El Fawal H., D. Georges, "Optimal control of complex irrigation systems via decomposition-coordination and the use of augmented Lagrangian", IEEE, SMC98, in press.

- [B.33]. Falvey H.T., "Philosophy and implementation of Gate Stroking". Proceedings ASCE Portland, Zimbelman D.D. (ed.), pp 176-179, 1987.
- [B.34]. Filipovic V., Milosevic Z., "Dyn² method for optimal control of water flow in open channels", Journal of irrigation and drainage engineering, Vol. 115, n° 6, 1989, pp. 973-981.
- [B.35]. Garcia A., M. Hubbard, J.J. DeVries, "Open channel transient flow control by discrete time LQR methods". Automatica, Vol. 28, n° 2, 1992, pp. 255-264.
- [B.36]. Goussard J., "Automation of canal irrigation systems". International Commission of Irrigation and Drainage, Working Group on Construction, Rehabilitation and Modernization of Irrigation Project, ICID, 1993.
- [B.37]. Hubbard M., J.J. DeVries, Balogun O.S., "Feedback control of open channel flow with guaranteed stability". AIRH Congress, 1987, pp. 408-413.
- [B.38]. Khaladi A., "Gestion automatique des transferts d'eau en reseaux hydrauliques mailles a surface libre ; Application au reseau des Wateringues", These de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1992, Cemagref.
- [B.39]. Kosuth P., "Techniques de regulation automatique des systemes complexes : application aux systemes hydrauliques a surface libre", These de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse - CEMAGREF - LAAS CNRS, 1994.
- [B.40]. Lin Z., D.H. Manz, "Optimal operation of irrigation canal systems using nonlinear programming - dynamic simulation model", Cemagref - IIMI International Workshop, Montpellier, October 1992, pp. 297-306.
- [B.41]. Litrico X., D. Georges, J.-L. Trouvat, "Modelling and robust control of a dam-river system", IEEE, SMC98, in press.
- [B.42]. Litrico X., P.-O. Malaterre, D. Georges, J.L. Trouvat, "Commande Optimale d'un Systeme Barrage-Riviere avec Points de Mesure Intermediaires", Colloque SHF, 25th Journees de l'Hydraulique, 15-17 Septembre 1998, Chambéry, France.
- [B.43]. Liu F., J. Feyen, J. Berlamont, "Computation method for regulating unsteady flow in open channels". Journal of irrigation and drainage engineering, Vol. 118, n° 10, 1992, pp. 674-689.
- [B.44]. Liu F., J. Feyen, J. Berlamont, "Downstream control algorithm for irrigation canals", Journal of irrigation and drainage engineering, Vol. 120, n° 3, 1994, pp. 468-483.
- [B.45]. Malaterre P.-O., "Modelisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation", These de Doctorat LAAS-CNRS-ENGREF-Cemagref, Etude EEE n°14, 1994, ISBN 2-85362-368-8.
- [B.46]. Malaterre P.-O., "PILOTE: linear quadratic optimal controller for irrigation canals", ASCE Journal of Irrigation and Drainage. To appear in July/August 1998, Vol. 124, n°4, ISSN 0733-9437.
- [B.47]. Malaterre P.-O., "Regulation of irrigation canals: characterisation and classification", Int. Journal of Irrigation and Drainage Systems, Vol. 9, n°4, November 1995, pp. 297-327.

- [B.48]. Malaterre P.-O., D.C. Rogers, J. Schuurmans, "Classification of Canal Control Algorithms", ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Jan./Feb. 1998, Vol. 124, n°1, pp. 3-10, ISSN 0733-9437.
- [B.49]. Malaterre P.-O., J. Rodellar, "Multivariable predictive control of irrigation canals. Design and evaluation on a 2-pool model". International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24, 1997, pp. 230-238.
- [B.50]. O'Loughlin E.M., "Application of unsteady flow analysis to operation decisions in long aqueducts", R. 16, Q. 28-2, VIIIth ICID Congress, 1972, Bulgaria.
- [B.51]. Pages J.C., J.M. Compas, "MIMO Predictive Control with Constraints by using Embedded Model-Based Systems", IEEE, SMC98, in press.
- [B.52]. Piquereau A., H. Tardieu, J. Verdier, A. Villocel, "Reduction des pertes en eau par Pautomatisation de la gestion d'un barrage realimentant une riviere en vue de Pirrigation", XII congress ICID, 1984.
- [B.53]. Reddy J.M., A. Dia, A. Oussou, "Design of control algorithm for operation of irrigation canals", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 118, n° 6, 1992, pp. 852-867.
- [B.54]. Rodellar J., M. Gomez, L. Bonet, "Control method for on-demand operation of open-channel flow", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 119, n° 2, 1993, pp. 225-241.
- [B.55]. Rogers DC, D.G. Ehler, H.T. Falvey, E.A. Serfozo, P. Voorheis, R.P. Johansen, R.M. Arrington, L.J. Rossi, "Canal systems automation manual, vol. 2", Bureau of Reclamation, Denver CO, 1995.
- [B.56]. Ruiz Carmona V., "Predictive Control in Irrigation Canal Operation", IEEE, SMC98, in press.
- [B.57]. Sabet M.H., J.Q. Coe, H.M. Ramirez, D.T. Ford, "Optimal operation of California Aqueduct", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 111, n° 2, 1985, pp. 222-237.
- [B.58]. Sanfilippo F., "Application de Pautomatique multivariable a la regulation des canaux. Comparaison avec une approche monovariable", 24 Octobre 1997, These de Doctorat, Universite Claude Bernard, Lyon 1, SCP, France.
- [B.59]. Sawadogo S., "Modelisation, commande predictive et supervision d'un systeme d'irrigation", These de Doctorat, LAAS-CNRS Toulouse, 1992.
- [B.60]. Schaalje M., D.H. Manz, "ANN controller", Personal communication, 1993.
- [B.61]. Schuurmans J., "Control of water levels in open channels", PhD thesis, 14 October 1997, 223 p, ISBN 909010995-1, Delft, Netherland.
- [B.62]. Schuurmans J., O.H. Bosgra, R. Brouwer, "Open-channel flow model approximation for controller design", TU Delft, Appl. Math Modelling 1995, Vol. 19, September, pp. 525-530.

- [B.63]. Seatzu C, A. Giua, G. Usai, "Decentralized volume control of open-channels using H2 norm minimization", IEEE, SMC98, in press.
- [B.64]. Shand M.J., "Automatic downstream control systems for irrigation canals", PhD, University of California, Berkeley, 1971.
- [B.65]. Stringam B.L., G.P. Merkley, "Field Application of a fuzzy controller for an irrigation canal in Roosevelt Utah", International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24, 1997, pp. 349-354
- [B.66]. Stringam B.L., G.P. Merkley, "Fuzzy controller simulation for local downstream water level control in canals", International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24, 1997, pp. 342-348
- [B.67]. Tomicic B., "A general optimization module for real-time control of surface water resources", Master of Science, The International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delft University, 1989.
- [B.68]. Toudeft A., "Combining neural and adaptive controllers for a non-minimum phase varying time delay system", Journees Hispano-Francaises: Systemes intelligents & controle avance, Barcelona (Spain), Universite Polytechnique de Catalogne, November 12-13, 1996
- [B.69]. Toudeft A., "Neural control of nonlinear non-minimum phase dynamical systems", in the Proc. of the Intern. Conf. on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms, Ales, France, May, 18-21, 1995.
- [B.70]. Voron B., A.-P. Bouillot, "Application of the fuzzy set theory to the control of a large canal", International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals: State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco), April 22-24, 1997, pp. 317-331
- [B.71]. Xu C.-Z., G. Sallet, "Proportional and Integral Regulation of Irrigation canal Systems governed by the St Venant Equation," IEEE SMC 1998, in press.
- [B.72]. Zimelman D.D., "Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems. Proceedings of a symposium ASCE", Portland, Oregon, USA, 28-30 July 1987, 377 p
- [B.73]. Παπαζαφειρίου Ζ. (1998). Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- [B.74]. Θεογάρης Μ. (2000). Αρδεύσεις-Στραγγίσεις. Τει Ηπείρου, Άρτα.
- [B.75]. Θεογάρης Μ. (1988). Η άρδευση με σταγόνες. Τει Ηπείρου, Άρτα.
- [B.76]. Πατακιούτας Γ. (2001). Αρδεύσεις-Στραγγίσεις. Τει Ηπείρου, Άρτα.
- [B.77]. Ψωμάς Ε. (1988). Αρδεύσεις-Στραγγίσεις. Τει Ηπείρου, Άρτα.
- [B.78]. Τερζίδης Γ., Παπαζαφειρίου Ζ. (1994). Γεωργική Υδραυλική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- [B.79]. Μιγελάκη Ν. (1988). Άρδευση με σταγόνες. Εκδοτική Αγροτεχνική, Αθήνα.

- [B.80]. Ουζούνη Δ. (1985). Η θεωρητική και πρακτική μέθοδος αρδεύσεως με σταγόνες. Εκδόσεις Γαστραγάνη, Θεσσαλονίκη.
- [B.81]. Πουλοβασίλης Α. (1986). Σημειώσεις Γεωργικής Υδραυλικής. Αρδεύσεις Ι. Γ.Π.Α., Αθήνα.
- [B.82]. ΚΑΛΛΙΓΑΡΟΣ Δ. (2004). «Η κοστολόγηση του νερού άρδευσης στην Ελλάδα»
- [B.83]. S. S. You, Y. –H. Chai, "Multi-Objective Control Synthesis: an application to 4WS passengers vehicles", *Mechatronics* 9 (1999), pp. 363 – 390.
- [B.84]. D.A. Schoenwald, (2000), "AUVs: In space, Air, Water, and on the Ground", *IEEE Control System Magazine*, vol.20, no. 6, pp. 15-18.
- [B.85]. J. Yuh and T. Ura, (1996), "Gust editors' Introduction, special issues on autonomous underwater robots'" *Autonomous Robots*, pp. 75-77.
- [B.86]. Ackermann, J., Sienel, W., and Steinhauser, R., (1993), "Robust automatic steering of a bus", *Proc. ECC'93 European Control Conference*, Groningen, The Netherlands, 3, pp.1534-1539.
- [B.87]. Ackermann, J., and W. D. Arenberg, (1990), "Automatic track control of a city bus". *IFAC Theory Report on Benchmark Problems for Control System Design*,
- [B.88]. Ackermann, J., and Sienel, W., (1993), "Robust yaw damping of cars with front and rear wheel steering", *IEEE Trans. on Control System Technology*, 1, pp.15-20.
- [B.89]. Ackermann, J., (1994), "Robust decoupling of a car steering dynamics with arbitrary mass distribution", *In Proc. Amer. Control Conf.*, Baltimore, pp. 1964-1968.
- [B.90]. Ackermann, J., (1994), "Robust car steering by yaw rate control", *In Proc. IEEE Conf. Decision Contr.*, Honolulu, HI, Dec., pp. 2033-2034
- [B.91]. Ackermann, J., (1994), "Robust decoupling, ideal dynamics and yaw stabilization of 4WS cars", *Automatica.*, 30, pp.1761-1768.
- [B.92]. Ackermann, J., A. Barlett, D. Kaesbauer, W. Sienel and R. Steinhauser (1993). *Robust Control (system with uncertain physical parameters)*, Springer, London
- [B.93]. Furukawa, Y., N. Yuhara, S. ano, H. Takeda and Y. Hatsushita (1989), "A review of four-wheels steering studies from the view point of vehicle dynamics and control", *Vehicle System Dynamics*, 18, pp. 151-186.
- [B.94]. McLean, J.R. and E.R. Hoffmann (1973), "The effects of restricted preview on driver steering control and performance", *Human Factors*, 15, 421-430.
- [B.95]. Ono, E., K. Takanami, N. Iwama, Y. Hayashi, Y. Hirano, and Y. Satoh, (1994), "Vehicle intergraded control for steering and traction systems by μ -synthesis", *Automatica.*, 30, pp.1639-1647.
- [B.96]. Ackermann, J., (1992), "Ein regelungsverfahren zur gierdämpfung von srab enfahrzeugen mit allradlenkung", *Deutsches Patentamt Munchen, Patentanmeldung P 4206654.9*, Mar 1992.
- [B.97]. Sanos, S., Y. Furakawa and S. Shiraishi (1986), "Four wheel steering system with rear wheel steer angle controlled as a function of steering wheel angle", *SAE Paper*, 860625

- [B.98]. Bakker, E., H.B. Pacejka and L.Linder (1989), "A new tire model with an application in vehicle dynamics studies", SAE Paper, 890087
- [B.99]. Pacejka H.B. (1979), "Tire factors and vehicle handling", Int. J. of Vehicle Design, 1, pp.1-23.
- [B.100]. Naito, G., E. Yaguchi, T. Matuda, M. Asahi, T. Nakata and I. Inokuchi (1990), "New electronically controlled torque split 4WD system for improving cornering performance", SAE Paper, 900056.
- [B.101]. Metz, D., and J. Maddock, (1986), "Optimal ride height and pitch control for championship race cars", Automatica, 22, pp. 509-520.
- [B.102]. M.G. Skarpetis, "Robust Automatic Control of Vehicles", Pd thesis, IKY (Μεταδιδακτορική έρευνα στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών), 2000.
- [B.103]. F. N. Koumboulis, M.G.Skarpetis, N.D. Kouvakas and N.S. Vlachos, "Noninteracting control for submarine straight horizontal course", 8th IEEE Mediterranean Conference on Control & Automation, ISIC-2000, Patra Greece, 2000.
- [B.104]. F. N. Koumboulis and M.G.Skarpetis, "Automatic steering control of unmanned vehicles, **System and Control: Theory and Applications**, Electrical and Computer Eng. Series, World Scientific and Eng. Society Press, pp. 180-182, 2000.
- [B.105]. M.G.Skarpetis and F. N. Koumboulis, "Multi-Objective robust control for 4WS cars", **System and Control: Theory and Applications**, Electrical and Computer Eng. Series, World Scientific and Eng. Society Press, pp. 169-171, 2000.
- [B.106]. F. N. Koumboulis, M. G. Skarpetis and N. D. Kouvakas, "An adaptive neural controller for 4Ws cars", IFDICON' 2001, European Workshop on Service and Humanoid Robots, Santorini, June 24-28, 2001.
- [B.107]. F. N. Koumboulis, M. G. Skarpetis, N. D. Kouvakas and B. G. Mertzios, "Tracking control of an articulated vehicle using P-D feedback", Ktisivios, Santorini, Greece, June 28-30, 2001.
- [B.108]. F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Robust control of cars with front and rear wheel steering", IEE Proceedings – Control Theory and Applications, vol. 149, pp. 394-404, 2002.
- [B.109]. F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Robust Triangular Decoupling with Application to 4WS Cars", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 45, pp. 344-352, 2000.
- [B.110]. S. Bhattacharyya, A.C. del Nero Gomes and J.W.Houze, "The structure of robust disturbance rejection control", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 28, pp. 874-861, 1983.
- [B.111]. G. Zames and J.G. Owen, "Duality Theory for MIMO robust disturbance rejection", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 38, pp. 743-752, 1993.
- [B.112]. J.H.Su and I.K.Fong, "Robust stability analysis of linear continuous / discrete-time systems with output feedback controllers", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 38, pp. 1154-1158, 1993.
- [B.113]. L.H. Keel, S.P.Bhattacharyya and J.W.Howze, Robust control with structured perturbations, IEEE Trans. Automat. Control, 339, (1988), pp. 68-78.

- [B.114]. B.R. Barmish, and H.I. Kang, A survey of extreme points results for robustness of control systems, *Automatica*, 24, (1993), pp. 713-35.
- [B.115]. Koumboulis, F.N., (1994), "Input output triangular decoupling and data sensitivity", *Automatica*, vol. 32, pp. 569-573, 1996.
- [B.116]. F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Input -Output decoupling for linear systems with non-linear uncertain structure", *J. of the Franklin Institute*, vol. 333(B), pp. 593-624, 1996.
- [B.117]. F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "Output feedback decoupling of linear systems with non-linear uncertain structure", *J. of the Franklin Institute*, vol. 333(B), pp. 625-629, 1996.
- [B.118]. F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis "Robust Disturbance Rejection with Simultaneous Robust Input - Output Decoupling", *Automatica*, vol. 33, pp. 1415-1421, 1997.
- [B.119]. P. E. Κίνγκ, **Υπολογιστική Νοημοσύνη στον Έλεγχο Συστημάτων**, Εκδόσεις Π. Τραυλός
- [B.120]. Γ. Πίζος, **Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα**, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 1996.
- [B.121]. Ferrari, S., Stengel, R. F. "An Adaptive Critic Global Controller," submitted to the American Control Conference, Anchorage, AK, May 2002.
- [B.122]. Ferrari, S., Stengel, R. F. "Algebraic Training of a Neural Network," submitted to the IEEE Transactions on Neural Networks.
- [B.123]. Ferrari, S., Stengel, R. F. "Classical/Neural Synthesis of Nonlinear Control Systems," to appear in *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*.
- [B.124]. Ferrari, S., Stengel, R. F. "Algebraic Training of a Neural Network," *Proc. American Control Conference*, Arlington, VA, June 2001.
- [B.125]. Ferrari, S., Stengel, R. F. "Classical/Neural Synthesis of Nonlinear Control Systems," *Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Denver, CO, August 2000.
- [B.126]. Crispin, Y., Ferrari, S. "Model-Reference Adaptive Control of Chaos in Periodically Forced Dynamical Systems," *Proc. AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Bellevue, WA, September 1996.
- [B.127]. Crispin, Y., Ferrari, S. "Adaptive Control of Chaos Induced Capsizing of a Ship," in *Intelligent Engineering Systems through Artificial Neural Networks*, Vol. 5, Fuzzy Logic and Evolutionary Progr., C.H. Dagli et. al, Eols, ASME Press, NY, 1995.
- [B.128]. *Control Systems Magazine*, vol. 18, pp. 59-68, 1998.
- [B.129]. K. Schittkowski, "NLQPL: A FORTRAN-Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems," *Annals of Operations Research*, vol. 5, pp. 485-500, 1985.
- [B.130]. C. Blum, A. Roli, "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison", *ACM Computing Surveys*, vol 35, pp. 268–308, 2003.
- [B.131]. F.W. Glover, G.A. Kochenberger (Eds.), *Handbook of Metaheuristics*, in Series: Int. Series in Operations Research&Management Science, vol. 57, 2003, Springer.

- [B.132]. N. Azizi, S. Zolfaghari, "Adaptive temperature control for simulated annealing: a comparative study", *Comp. & Operations Research*, vol. 31, pp. 2439-2451, 2004.
- [B.133]. S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt Jr., M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, vol. 220, pp. 671- 680, 1983.
- [B.134]. H. Martínez-Alfaro, S. Gómez-García, "Mobile robot path planning and tracking using simulated annealing and fuzzy logic control", *Expert Systems with Applications*, vol. 15, pp. 421-429, 1998.
- [B.135]. M. Hanke, P. Li, "Simulated annealing for the optimization of batch distillation processes", *Computers & Chemical Engineering*, vol. 24, pp. 1-8, 2000.
- [B.136]. E.W. McGookin, D.J. Murray-Smith, "Submarine manoeuvring controllers' optimisation using simulated annealing and genetic algorithms", *Control Engineering Practice*, vol. 14, pp. 1-15, 2006.
- [B.137]. Y.-Z. Luo, G.-J. Tang, "Spacecraft optimal rendezvous controller design using simulated annealing", *Aerospace Science and Technology*, vol. 9, pp. 732-737, 2005.
- [B.138]. R. Faber, T. Jockenhövel, G. Tsatsaronis, "Dynamic optimization with simulated annealing", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 29, pp. 273-290, 2005.
- [B.139]. K.L. Musser, J.S. Dhingra, G.L. Blankenship, "Optimization based job shop scheduling," *IEEE Trans. On Automatic Control*, vol. 38, pp. 808 –813, 1993.
- [B.140]. S. Chen, J. Wu, R.H. Istepanian, J. Chu, "Optimizing stability bounds of finite-precision PID controller structures," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 44, pp. 2149 –2153, 1999.
- [B.141]. M.P. Tzamtzi, F.N. Koumboulis, N.D. Kouvakas, G.E. Panagiotakis, "A Simulated Annealing Controller for Sloshing Suppression in Liquid Transfer", 14th Mediterranean Conf. on Control and Autom., Italy, 2006.
- [B.142]. N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, E. Teller, "Equation of state calculation using fast computing machines", *J. of Chemical Physics*, vol. 21, pp. 1087-1092, 1953.
- [B.143]. F. Nejari, G. Roux, B. Dahhou and A. Benhammou, "Estimation and optimal control design of a biological wastewater treatment plant", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 48, pp. 269-280, 1999.
- [B.144]. Ντελλής Αχιλλέας, "Εύρωστος έλεγχος για αυτοκίνητα με τετραδιεύθυνση", Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ ΧΑΛΚΙΔΑΣ, Τμήμα Αυτοματισμού, 2005.
- [B.145]. M. G. Skarpetis, F.N. Koumboulis, A.S Ntellis, G. Chamilothoris, "Robust Asymptotic Output Tracking for Four-Wheel-Steering Vehicles", 3rd IEEE International Conference on Mechatronics (ICM '06) July 3-5, 2006, Budapest, Hungary.
- [B.146]. M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, and A.S. Ntellis, "Robust Tracking for Time-Varying Uncertain Systems with Application to 4WS Vehicles", *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on Nov. 2006* Pages: 4689-4694

- [B.147]. M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, A.S. Ntellis and Apostolis Sarris, "Robust Controller Design for Active Hydraulic Suspension", ETFA 2007
- [B.148]. M. G. Skarpetis, F. N. Koumboulis, A.S. Ntellis and T.E Tsimos, "Robust Lane Keeping for a Tractor-Trailer", ETFA 2007
- [B.149]. Glidas Basancon, Jean-Francois Dulhotse and Didier Georges "Nonlinear Observer Design For water Level Control in Irrigation Canals", proceedings of the 40th IEEE Conference, Orlando, Florida USA, December 2001
- [B.150]. Bornard G. and Hammouri H. "A high gain observer for a class of uniformly observable system". IEEE CDC Conf. Brighton England 1991
- [B.151]. Colley R.L and Moin S.A "Finite element solution of Saint Venant equation", Journal of hydraulical Engineering. Division ASCE, Vol 102, No HY6, pp. 759-775.1976
- [B.152]. Dulhoste J-F, Besancon G and Georges D., "Non-linear control of a water flow dynamics by Input-Output Linearization based on a collocation Method mode", ECC2001, Porto, Portugal, September 2001.
- [B.153]. Fletcher C.A.J "Computation Galerkin Methods". Springer Series in computational Physics. Springer-Verlag 1984
- [B.154]. Georges D. Dullhost J-F, and Besancon G. "Modeling and control of water flow dynamics via a collocation model". MTNS2000.Perpignan, France 2000
- [B.155]. Isidor A.. Nonlinear Control Systems. Springer –Verlag Berlin 3rd edition. 1995
- [B.156]. Strekoff T. "Numerical Solution of Saint Venant equation" Journal of hydraulical Engineering. Division ASCE Vol. 96, NO HY1, pp 223-252.1970
- [B.157]. Villadsen J.V and Micheisen M.L. "Solution of differential equation models by polynomial approximation". Prentice Hall. Englewood Cliffs, N,J 1978



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000097865